Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego | Rzeczpospolita Polska | Dofinansowane przez Unię Europejską

Politechnika Świętokrzyska
Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej

Kierunek studiów:
Odnawialne Źródła Energii

Beata Galiszewska

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

OGRZEWANIE PASYWNE

opracowane w ramach realizacji Projektu
„Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki”
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025

Spis treści

1. Wprowadzenie 3
2. Metodyka 4
3. Założenia dla modelu bazowego 7
3.1. Charakterystyka budynku 7
3.2. Parametry przegród 11
3.3. Parametry użytkowe i zyski wewnętrzne 15
3.4. Lokalizacja i dane klimatyczne 16
3.5. Model analityczny 17
4. Wyniki symulacji dla modelu bazowego 19
5. Wyniki symulacji - warianty 21
5.1. Wariant I – orientacja budynku 21
5.2. Wariant II – zacienienie okien 25
5.3. Wariant III – izolacja ścian 27
5.4. Wariant IV – izolacja stropu zewnetrznego 29
5.5. Wariant V – izolacja podłogi na gruncie 31
5.6. Wariant VI – powierzchnia okien po stronie południowej 33
5.7. Wariant VII – powierzchnia okien po stronie północnej 35
5.8. Wariant VIII – powierzchnia okien po stronie wschodniej 37
5.9. Wariant IX – powierzchnia okien po stronie zachodniej 38
6. Wnioski ogólne do symulacji 40
7. Spis literatury 41

Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. Wprowadzenie

Rozwój budownictwa pasywnego jest wynikiem równoległego postępu w dziedzinie technologii materiałowych oraz cyfrowych metod analizy energetycznej, które razem pozwalają na projektowanie budynków o minimalnym zapotrzebowaniu na energię. Jego nadrzędnym celem jest maksymalne ograniczenie strat energii oraz wykorzystanie dostępnych zysków wewnętrznych i solarnych w taki sposób, aby zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku było minimalne. Zgodnie z kryteriami Instytutu Budynków Pasywnych (Passivhaus Institut, PHI), roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania nie powinno przekraczać 15 kWh/m² [1].

W niniejszym opracowaniu szczególną uwagę poświęcono zagadnieniu ogrzewania budynku pasywnego, analizie czynników kształtujących jego zapotrzebowanie na energię cieplną oraz temu, w jaki sposób najnowsze osiągnięcia technologii BIM mogą zostać wykorzystane do oceny efektywności tego procesu. Współczesne projektowanie architektoniczne coraz częściej odchodzi od tradycyjnych, uproszczonych metod obliczeń energetycznych na rzecz symulacji komputerowych. Pozwalają one na:

- uwzględnienie rzeczywistej geometrii budynku,
- modelowanie różnych wariantów izolacji, okien i systemów grzewczych,
- analizę wpływu orientacji i warunków klimatycznych,
- szybkie porównanie wielu scenariuszy projektowych.

Dzięki temu już na etapie koncepcji można przewidzieć zapotrzebowanie na ogrzewanie i zoptymalizować budynek tak, aby spełniał wymagania domu pasywnego.

Jednym z najważniejszych kierunków rozwoju współczesnego projektowania jest wykorzystanie technologii BIM (Building Information Modeling). BIM nie tylko gromadzi dane geometryczne budynku, ale również informacje o materiałach, właściwościach cieplnych przegród, parametrach stolarki i systemach instalacyjnych. Dzięki temu BIM staje się kompletnym źródłem danych do analiz energetycznych, bez konieczności ręcznego przepisywania informacji do odrębnych narzędzi. Integracja BIM z oprogramowaniem analitycznym pozwala na znaczną automatyzację i przyspieszenie obliczeń, a także eliminuje wiele błędów wynikających z niezgodności danych.

Rok 2025 przyniósł istotne zmiany w ekosystemie oprogramowania Autodesk, związane z wycofaniem dotychczasowych narzędzi: Green Building Studio i Insight Energy Analysis oraz wprowadzeniem nowej platformy Autodesk Insight Carbon Analysis.

Nowe rozwiązanie:

- integruje się bezpośrednio z modelem BIM w programie Revit,
- umożliwia symulacje w chmurze przy użyciu silników DOE-2 i EnergyPlus,
- pozwala analizować zużycie energii, emisję CO_2 oraz wpływ różnych wariantów projektowych,
- umożliwia przeprowadzanie symulacji z uwzględnieniem takich czynników jak systemy grzewczo-wentylacyjne (Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC), parametry izolacyjności przegród, poziom infiltracji powietrza, orientacja obiektu względem stron świata oraz charakterystyka stolarki okiennej [2].

Autodesk Insight Carbon Analysis stanowi innowacyjne narzędzie w obszarze technologii BIM, które znajduje się obecnie na etapie intensywnego rozwoju oraz stopniowej implementacji w praktyce projektowej. Niniejsze opracowanie podejmuje próbę jego wykorzystania do analizy zapotrzebowania na energię grzewczą w budynku pasywnym, co należy uznać za zagadnienie szczególnie istotne w kontekście polityki energetycznej, wyzwań związanych z transformacją w kierunku niskoemisyjnej gospodarki oraz rosnącej roli koncepcji zrównoważonego budownictwa [3].

2. Metodyka

W niniejszym opracowaniu do modelowania budynku wykorzystano oprogramowanie Autodesk Revit, natomiast do analiz energetycznych – platformę Autodesk Insight Carbon Analysis. Oba narzędzia są ze sobą zintegrowane w ramach środowiska Autodesk i działają w oparciu o model BIM jako podstawowe źródło danych.
Autodesk Revit jest narzędziem BIM, które umożliwia tworzenie modelu architektonicznego i konstrukcyjnego wraz z bazą informacji o elementach budynku. Na potrzeby analiz energetycznych Revit generuje tzw. Energy Analytical Model (EAM), czyli uproszczoną reprezentację geometryczną obiektu, uwzględniającą:

- podział na strefy przestrzenne,
- charakterystykę przegród (grubość, warstwy, współczynnik przenikania ciepła)
- parametry stolarki okiennej i drzwiowej,
- powierzchnię użytkową i kubaturę,

Energy Analytical Model jest eksportowany do Insight, gdzie stanowi bazę dla symulacji energetycznych.
Autodesk Insight Carbon Analysis działa jako usługa chmurowa, która na podstawie danych geometrycznych i materiałowych dostarczonych z Autodesk Revit tworzy model analityczny budynku i poddaje go obliczeniom energetycznym [3].

Sposób, w jaki Insight interpretuje dane geometryczne i materiałowe z programu Revit, zależy od ustawień modelu analitycznego. W trybie Conceptual Types program przypisuje wartości schematyczne dla poszczególnych typów przegród (ściany, dachy, podłogi), niezależnie od ich definicji materiałowych. Dopiero wybór opcji Use Detailed Elements powoduje, że do obliczeń eksportowane są rzeczywiste współczynniki przenikania ciepła (U) wynikające z warstw materiałowych zdefiniowanych w programie Revit. W niniejszej analizie zastosowano wariant szczegółowy, aby zapewnić spójność między modelem BIM a symulacją energetyczną. Nie wszystkie dane zdefiniowane w programie Revit są automatycznie wykorzystywane przez Insight. Program przejmuje wprost parametry dotyczące obciążeń wewnętrznych (zyski ciepła od ludzi, oświetlenia i urządzeń) oraz nastaw temperatury ogrzewania i chłodzenia, gdyż stanowią one integralną część Energy Analytical Model. Natomiast wartości takie jak infiltracja powietrza czy system HVAC nie są importowane z programu Revit, lecz muszą zostać określone w module Simulation Factors Insight [2]. To rozdzielenie danych wejściowych sprawia, że Insight bazuje jednocześnie na informacjach wynikających z modelu BIM i na ujednoliconych parametrach symulacyjnych, które można modyfikować wariantowo. Rdzeń obliczeniowy programu opiera się na silnikach stosowanych powszechnie w symulacjach budynków: DOE-2 oraz EnergyPlus/NRG+.
DOE-2 jest dojrzałym i zweryfikowanym silnikiem obliczeniowym, wykorzystywanym w Stanach Zjednoczonych w ramach norm ASHRAE 90.1 oraz w procedurach certyfikacyjnych. Pozwala na modelowanie obciążeń cieplnych i zapotrzebowania na energię w funkcji klimatu, geometrii oraz zysków wewnętrznych.
EnergyPlus, w Insight wykorzystywany pod nazwą NRG+, stanowi jego nowsze rozwinięcie i umożliwia bardziej szczegółowe odwzorowanie zjawisk dynamicznych, w tym wpływu systemów HVAC, strategii wentylacji oraz odnawialnych źródeł energii. Integracja obu silników pozwala na uzyskanie obliczeń zgodnych z metodologią amerykańską (ASHRAE), a jednocześnie wystarczająco uniwersalnych, by stosować je także w kontekście europejskim. Kluczowym elementem działania Insight jest wykorzystanie danych klimatycznych przypisanych do lokalizacji geograficznej projektu. Użytkownik wskazuje w programie Revit konkretną lokalizację budynku (miasto, współrzędne geograficzne), a Insight automatycznie pobiera odpowiedni zestaw danych pogodowych z bazy Typical Meteorological Year (TMY). Dane te obejmują m.in. temperatury powietrza, promieniowanie słoneczne, wilgotność, prędkość wiatru i są wykorzystywane jako warunki brzegowe symulacji. Dzięki temu zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia jest ściśle powiązane z rzeczywistym klimatem danego regionu. Symulacje w Insight mają charakter godzinowy. Program analizuje profil energetyczny budynku w cyklu rocznym, z krokiem czasowym jednej godziny. Uwzględnia to zmienność warunków

atmosferycznych, zysków wewnętrznych oraz pracy systemów technicznych. Wyniki są następnie agregowane do postaci rocznych sum energii w poszczególnych kategoriach (Heating, Cooling, Lighting, Equipment itp.) oraz wskaźnikach intensywności np. energetycznej (EUI).

Dzięki takiemu podejściu Insight nie jest narzędziem opartym wyłącznie na statycznych bilansach energetycznych (jak np. Passive House Planning Package), lecz na dynamicznej symulacji bilansu cieplnego budynku w skali całego roku, co pozwala na szczegółową analizę wpływu zarówno warunków pogodowych, jak i zmiennych parametrów projektowych.

Autodesk Insight Carbon Analysis jest to stosunkowo nowe narzędzie, które znajduje się na etapie intensywnego rozwoju i nie jest jeszcze w pełni dopracowane. Jego istotną zaletą jest jednak pełna integracja z modelem BIM, dzięki czemu brak konieczności ręcznego przenoszenia danych do odrębnych narzędzi ogranicza ryzyko błędów i zwiększa wiarygodność wyników analizy. W ustawieniach domyślnych program Insight wykorzystuje tzw. Ideal Loads Air System. Jest to uproszczony model obliczeniowy strefy, w którym zakłada się istnienie idealnego systemu grzewczo-chłodzącego, zdolnego w sposób natychmiastowy i bez strat pokrywać wszelkie obciążenia cieplne. W takim ujęciu nie uwzględnia się charakterystyki technicznej urządzeń ani strat przesyłu, a raportowane wartości ogrzewania i chłodzenia odpowiadają wprost energii użytkowej. Dopiero zastosowanie zdefiniowanego systemu HVAC w module Simulation Factors umożliwia włączenie do obliczeń rzeczywistych parametrów sprawnościowych instalacji, co pozwala przejść od analizy w zakresie energii użytkowej do estymacji zużycia energii końcowej.

Należy mieć także świadomość, że Autodesk Insight Carbon Analysis:

- nie raportuje energii pierwotnej odnawialnej (PER), wymaganej w kryteriach PHI,
- korzysta z założeń ASHRAE, które różnią się od europejskich norm EN ISO stosowanych w obliczeniach dla budynków pasywnych,
- w zakresie harmonogramów użytkowania opiera się na standardowych profilach, które mogą nie odpowiadać rzeczywistym scenariuszom użytkowania budynku jednorodzinnego.

Mimo tych ograniczeń Insight stanowi nowoczesne narzędzie BIM, pozwalające na szybką analizę wariantową i porównanie wpływu poszczególnych czynników projektowych na zapotrzebowanie na energię, w tym na ogrzewanie budynku pasywnego.

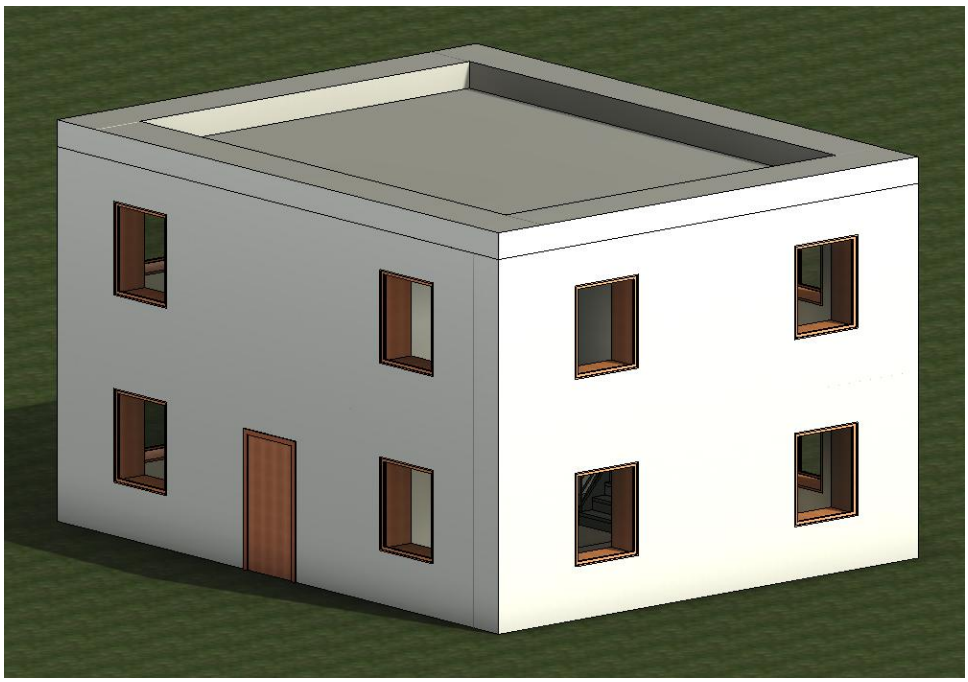
3. Założenia dla modelu bazowego

Punktem wyjścia do przeprowadzenia obliczeń energetycznych jest określenie podstawowych cech analizowanego budynku, jego parametrów fizycznych oraz danych klimatycznych, które stanowią bazę do dalszych symulacji.

3.1. Charakterystyka budynku

Analizowany obiekt stanowi model jednorodzinnego budynku mieszkalnego o charakterze pasywnym, opracowany w środowisku Autodesk Revit. Budynek jest niepodpiwniczony, dwukondygnacyjny, bez poddasza użytkowego, a jego górną przegrodę stanowi stropodach (Rys. 3). Zastosowana forma architektoniczna jest zwarta i uproszczona, co sprzyja minimalizacji strat cieplnych oraz ograniczaniu mostków termicznych.

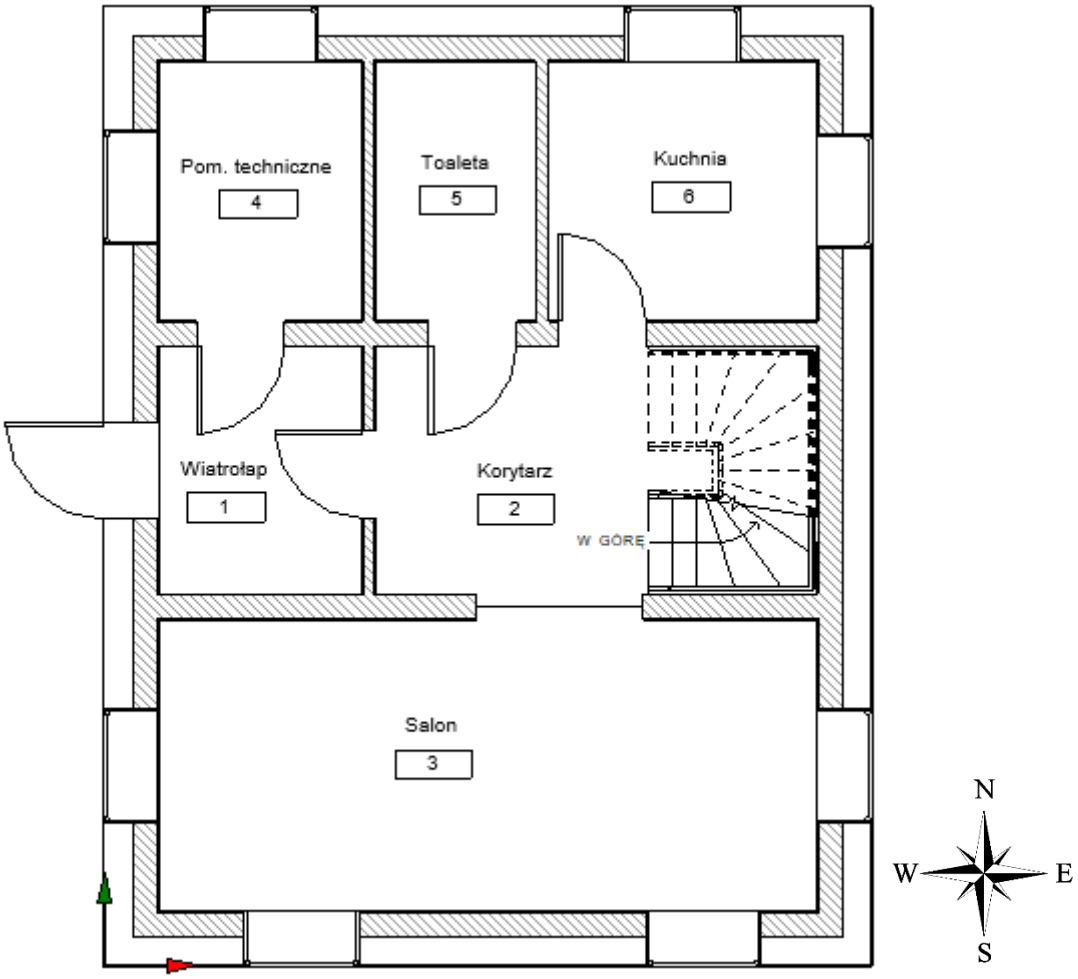
[Tekst alternatywny do Rys. 1. Na ilustracji przedstawiono komputerowy model 3D prostokątnego budynku dwupiętrowego o płaskim dachu. Ściany są gładkie, w jasnych kolorach – lewa ściana jest szara, a prawa biała. W każdej ścianie znajdują się prostokątne okna z brązowymi ramami – po dwa na parterze i po dwa na piętrze. Na ścianie po lewej stronie znajduje się także prostokątne drzwi wejściowe w kolorze brązowym. Budynek stoi na zielonej powierzchni imitującej trawę.]



Rys. 1. Model 3D obiektu

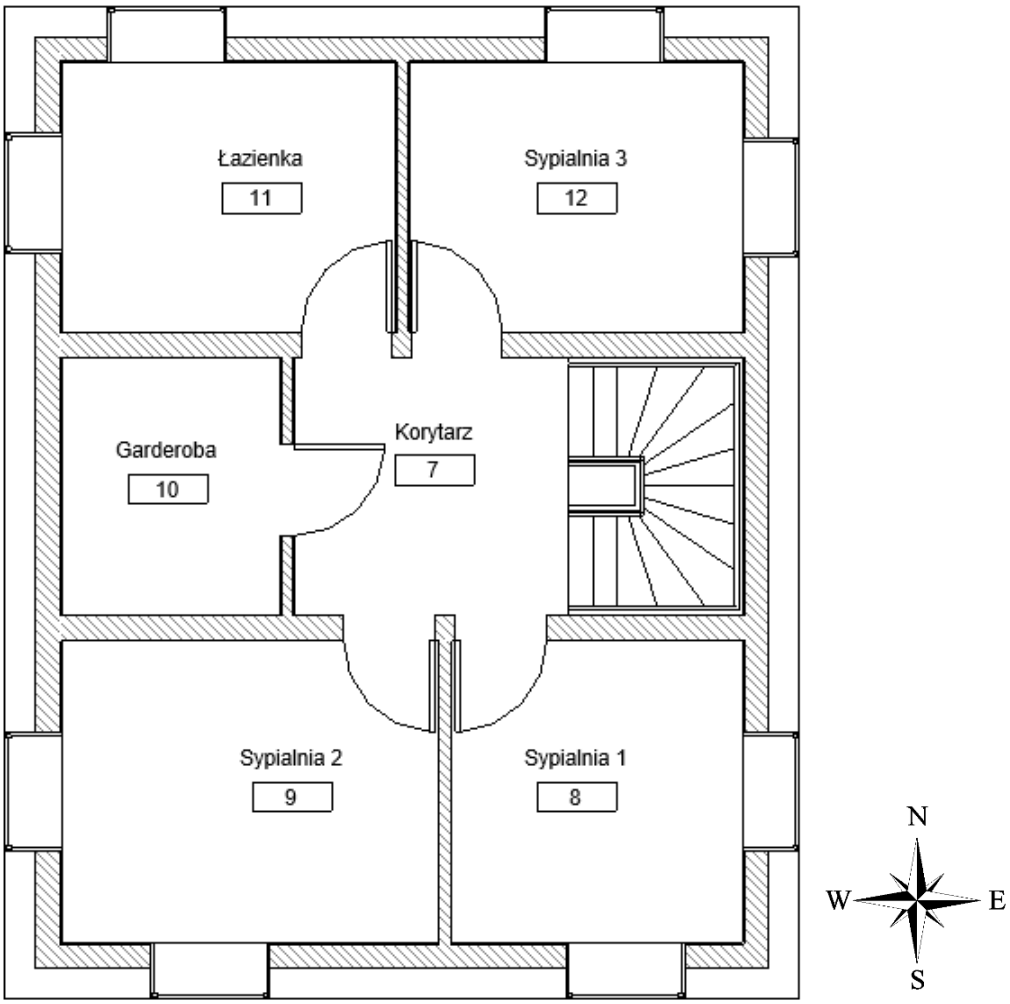
Całkowita powierzchnia użytkowa budynku wynosi 112,61 m², a kubatura ogrzewana 269,86 m³. Obiekt został zlokalizowany w miejscowości Kielce, w III strefie klimatycznej Polski (zgodnie z PN-EN 12831), dla której temperatura obliczeniowa okresu zimowego wynosi –20°C. Przyjęty układ funkcjonalny pomieszczeń został zoptymalizowany pod kątem standardu pasywnego. Strefy dzienne i pomieszczenia o największym zapotrzebowaniu na ciepło rozmieszczono od strony południowej, natomiast pomieszczenia pomocnicze i techniczne od strony północnej, co zaprezentowano na Rys. 2 i 3.

[Tekst alternatywny do Rys. 2. Rysunek przedstawia rzut parteru budynku, czyli plan pomieszczeń widzianych z góry. Wejście znajduje się od strony zachodniej, czyli po lewej stronie rysunku. Po wejściu przez drzwi wchodzi się do wiatrołapu oznaczonego numerem 1, z którego prowadzi przejście do korytarza oznaczonego numerem 2. Z korytarza dostępne są wszystkie pozostałe pomieszczenia na parterze. Największe z nich to salon oznaczony numerem 3, zajmujący całą południową część budynku. W północnej części domu, czyli u góry rysunku, znajdują się kolejno od lewej: pomieszczenie techniczne oznaczone numerem 4, toaleta oznaczona numerem 5 oraz kuchnia oznaczona numerem 6. Wschodnia część korytarza zawiera klatkę schodową, która prowadzi na wyższą kondygnację. Na dole rysunku umieszczona jest róża wiatrów, wskazująca, że północ znajduje się u góry, południe na dole, wschód po prawej, a zachód po lewej stronie.]



Rys. 2. Rzut parteru

[Tekst alternatywny do Rys. 3. Rysunek przedstawia rzut piętra budynku, czyli plan pomieszczeń widzianych z góry. Centralnym punktem kondygnacji jest korytarz oznaczony numerem 7, do którego prowadzą schody umieszczone po prawej stronie. Z korytarza dostępne są wszystkie pomieszczenia piętra. W południowej części, czyli na dole rysunku, znajdują się dwie sypialnie: po lewej stronie sypialnia 2 oznaczona numerem 9, a po prawej sypialnia 1 oznaczona numerem 8. W północnej części, czyli u góry rysunku, po lewej stronie znajduje się łazienka oznaczona numerem 11, a po prawej sypialnia 3 oznaczona numerem 12. Po zachodniej stronie, między łazienką a sypialnią 2, umieszczona jest garderoba oznaczona numerem 10. Na dole rysunku widoczna jest róża wiatrów wskazująca kierunki świata: północ u góry, południe na dole, wschód po prawej i zachód po lewej stronie.]



Rys. 3. Rzut piętra

W tabeli 1 przedstawiono wykaz pomieszczeń wraz z ich powierzchniami użytkowymi i kubaturami, z podziałem na poszczególne kondygnacje.

Tabela 1. Zestawienie pomieszczeń

Numer	Nazwa	Powierzchnia	Objętość
Poziom 0			
1	Wiatrołap	5.51 m²	13.41 m³
2	Korytarz	12.12 m²	31.17 m³
3	Salon	21.05 m²	51.25 m³
4	Pom. techniczne	5.77 m²	14.04 m³
5	Toaleta	4.52 m²	11.00 m³
6	Kuchnia	7.58 m²	18.44 m³
Poziom 1			
7	Korytarz	11.69 m²	27.24 m³
8	Sypialnia 1	8.89 m²	20.71 m³
9	Sypialnia 2	11.53 m²	26.85 m³
10	Garderoba	5.72 m²	13.32 m³
11	Łazienka	9.13 m²	21.26 m³
12	Sypialnia 3	9.09 m²	21.18 m³
Suma ogólna: 12		112.61 m²	269.86 m³

3.2. Parametry przegród

Do opracowania modelu wykorzystano materiały dostępne w standardowej bibliotece programu Revit, a ich podstawowe właściwości cieplno-fizyczne zostały zestawione w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie właściwości cieplno-fizycznych materiałów

Materiał	Przewodność cieplna	Ciepło właściwe	Gęstość
Beton - łata piaskowa/cementowa	1,046 W/(m·K)	657 J/(kg·°C)	2 300 kg/m^3
Beton, wylewany na miejscu budowy	1,046 W/(m·K)	657 J/(kg·°C)	2 300 kg/m
Dach - papa	0,5 W/(m·K)	1 000 J/(kg·°C)	1 700 kg/m^3
Gazobeton	1,3 W/(m·K)	840 J/(kg·°C)	1 800 kg/m^3
Gipsowa płyta ścienna	0,65 W/(m·K)	840 J/(kg·°C)	1 100 kg/m^3
Izolacja sztywna	0,035 W/(m·K)	1 470 J/(kg·°C)	23 kg/m^3
Piach	0,335 W/(m·K)	100 J/(kg·°C)	1 600 kg/m^3
Płytka ceramiczna	1,2 W/(m·K)	850 J/(kg·°C)	2 000 kg/m^3
Tynk mineralny	0,72 W/(m·K)	840 J/(kg·°C)	1 900 kg/m^3
Wykończenie — białe	0,25 W/(m·K)	900 J/(kg·°C)	1400 kg/m^3
Zabezpieczenie przed wilgocią	1,15 W/(m·K)	840 J/(kg·°C)	2 330 kg/m^3

Dane konstrukcyjne przegród zostały wyeksportowane z modelu BIM w programie Revit i przedstawione w tabelach 3 – 10. Grubości w tabelach podano w mm.

Tabela 3. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Ściana wewnętrzna nośna

Typ:	Ściana wewntętrzna 25
Całkowita grubość:	262.0 (Domyślnie)
Opór (R):	0.2077 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	387.24 kJ/(m²·K)

Warstwy

STRONA ZEWNĘTRZNA

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Wykończenie 2 [5]	Wykończenie — białe	1.0
2	Wykończenie 2 [5]	Gipsowa płyta ścienna	5.0
3	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
4	Nośna [1]	Gazobeton	250.0
5	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**
6	Wykończenie 1 [4]	Gipsowa płyta ścienna	5.0
7	Wykończenie 2 [5]	Wykończenie — białe	1.0

Tabela 4. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Ściana wewnętrzna działowa

Typ:	Ściana wewntętrzna 12
Całkowita grubość:	132.0 (Domyślnie)
Opór (R):	0.1077 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	190.68 kJ/(m²·K)

Warstwy

STRONA ZEWNĘTRZNA

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Wykończenie 2 [5]	Wykończenie — białe	1.0
2	Wykończenie 2 [5]	Gipsowa płyta ścienna	5.0
3	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
4	Nośna [1]	Gazobeton	120.0
5	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**
6	Wykończenie 1 [4]	Gipsowa płyta ścienna	5.0
7	Wykończenie 2 [5]	Wykończenie — białe	1.0

Tabela 5. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Ściana zewnętrzna

Typ:	Ściana zewnętrzna
Całkowita grubość:	571.0 (Domyślnie)
Opór (R):	8.7868 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	402.00 kJ/(m²·K)

Warstwy

STRONA ZEWNĘTRZNA

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Wykończenie 2 [5]	Tynk mineralny	5.0
2	Izolacja termiczna/pustka [3]	Izolacja sztywna	300.0
3	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
4	Nośna [1]	Gazobeton	250.0
5	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**
6	Wykończenie 1 [4]	Gipsowa płyta ścienna	15.0
7	Wykończenie 2 [5]	Wykończenie — białe	1.0

Tabela 6. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Attyka

Typ:	Attyka
Całkowita grubość:	860.0 (Domyślnie)
Opór (R):	17.3352 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	398.29 kJ/(m²·K)

Warstwy

STRONA ZEWNĘTRZNA

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Wykończenie 2 [5]	Tynk mineralny	5.0
2	Izolacja termiczna/pustka [3]	Izolacja sztywna	300.0
3	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
4	Nośna [1]	Gazobeton	250.0
5	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**
6	Izolacja termiczna/pustka [3]	Izolacja sztywna	300.0
7	Wykończenie 2 [5]	Tynk mineralny	5.0

Tabela 7. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Ściana fundamentowa

Typ:	Ściana fundamentowa
Całkowita grubość:	505.0 (Domyślnie)
Opór (R):	6.0011 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	460.09 kJ/(m²·K)

Warstwy

STRONA ZEWNĘTRZNA

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Nośna [1]	Tynk mineralny	5.0
2	Nośna [1]	Izolacja sztywna	200.0
3	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
4	Nośna [1]	Beton, wylewany na miejscu bu	300.0
5	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**

Tabela 8. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Podłoga na gruncie

Typ:	Podłoga na gruncie
Całkowita grubość:	600.0 (Domyślnie)
Opór (R):	8.9572 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	399.70 kJ/(m²·K)

Warstwy

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Wykończenie 2 [5]	Płytka ceramiczna	20.0
2	Wykończenie 1 [4]	Beton - łata piaskowa/cemento	80.0
3	Izolacja termiczna/pustka [3]	Izolacja sztywna	300.0
4	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
5	Nośna [1]	Beton, wylewany na miejscu bu	150.0
6	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**
7	Membrana	Zabezpieczenie przed wilgocią	0.0
8	Podłoże [2]	Piach	50.0

Tabela 9. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Strop międzykondygnacyjny

Typ:	Strop międzykondygnacyjny
Całkowita grubość:	366.0 (Domyślnie)
Opór (R):	3.1168 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	398.79 kJ/(m²·K)

Warstwy

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Wykończenie 2 [5]	Płytka ceramiczna	20.0
2	Wykończenie 1 [4]	Beton - łata piaskowa/cemento	80.0
3	Izolacja termiczna/pustka [3]	Izolacja sztywna	100.0
4	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
5	Nośna [1]	Beton, wylewany na miejscu bu	150.0
6	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**
7	Wykończenie 1 [4]	Gipsowa płyta ścienna	15.0
8	Wykończenie 2 [5]	Wykończenie — białe	1.0

Tabela 10. Budowa i właściwości cieplne przegrody – Strop zewnętrzny

Typ:	Strop zew
Całkowita grubość:	471.0 (Domyślnie)
Opór (R):	8.7479 (m²·K)/W
Bezwładność cieplna:	259.17 kJ/(m²·K)

Warstwy

	Funkcja	Materiał	Grubość
1	Wykończenie 2 [5]	Dach - papa	5.0
2	Izolacja termiczna/pustka [3]	Izolacja sztywna	300.0
3	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy powyżej zawinięcia**	**0.0**
4	Nośna [1]	Beton, wylewany na miejscu bu	150.0
5	**Granica warstwy nośnej**	**Warstwy poniżej zawinięcia**	**0.0**
6	Wykończenie 1 [4]	Gipsowa płyta ścienna	15.0
7	Wykończenie 2 [5]	Wykończenie — białe	1.0

Tabela 11 przedstawia charakterystykę stolarki okiennej i drzwiowej wraz z ilością, wymiarami i niektórymi parametrami dotyczącymi charakterystyki cieplnej. Zastosowano okna z przeszkleniem potrójnym z powłoką niskoemisyjną SC=0,65. Zastosowano drzwi drewniane bez przeszkleń.

Tabela 11. Wymiary i charakterystyka cieplna stolarki okiennej i drzwiowej

Nazwa	Liczba	Szerokość	Wysokość	Współczynnik przenikania ciepła	Opór cieplny (R)
D1	9	0.92 m	2.03 m	2.1944 W/(m²·K)	0.4557 (m²·K)/W
DW	1	1.02 m	2.03 m	2.1944 W/(m²·K)	0.4557 (m²·K)/W

Nazwa	Liczba	Szerokość	Wysokość	Współczynnik przenikania	Opór cieplny (R)
O1	16	1.20 m	1.40 m	1.4554 W/(m²·K)	0.6871 (m²·K)/W

Tabela 12 przedstawia wartości współczynnika przenikania ciepła (U) oraz oporu cieplnego (R) dla poziomych przegród budowlanych: podłogi na gruncie, stropu międzykondygnacyjnego i stropu zewnętrznego.

Tabela 12. Parametry cieplne przegród poziomych

Typ	Współczynnik przenikania ciepła	Opór cieplny (R)
Podłoga na gruncie	0.1116 W/(m²·K)	8.9572 (m²·K)/W
Strop międzykondygnacyjny	0.3208 W/(m²·K)	3.1168 (m²·K)/W
Strop zew	0.1143 W/(m²·K)	8.7479 (m²·K)/W

Tabela 13 przedstawia wartości współczynnika przenikania ciepła (U) oraz oporu cieplnego (R) dla pionowych przegród budowlanych: attyki, ściany fundamentowej, ścian wewnętrznych 12 i 25 cm oraz ściany zewnętrznej.

Tabela 13. Parametry cieplne przegród pionowych

Typ	Współczynnik przenikania ciepła	Opór cieplny (R)
Attyka	0.0577 W/(m²·K)	17.3352 (m²·K)/W
Ściana fundamentowa	0.1666 W/(m²·K)	6.0011 (m²·K)/W
Ściana wewntętrzna 12	9.2857 W/(m²·K)	0.1077 (m²·K)/W
Ściana wewntętrzna 25	4.8148 W/(m²·K)	0.2077 (m²·K)/W
Ściana zewnętrzna	0.1138 W/(m²·K)	8.7868 (m²·K)/W

3.3. Parametry użytkowe i zyski wewnętrzne

Parametry użytkowe stanowią jeden z kluczowych elementów modelu energetycznego, ponieważ określają zyski ciepła wewnętrznego oraz warunki komfortu cieplnego, które determinują obciążenia grzewcze i chłodnicze budynku. W niniejszym opracowaniu dane te zostały zdefiniowane na poziomie stref (Spaces) w

programie Revit. Przyjęto założenie, że wszystkie strefy charakteryzują się jednolitymi wartościami parametrów, co odpowiada typowemu scenariuszowi użytkowania domu jednorodzinnego.
W tabeli 14 zestawiono najważniejsze wartości wejściowe przekazywane z programu Revit do Insight i uwzględniane w symulacjach.

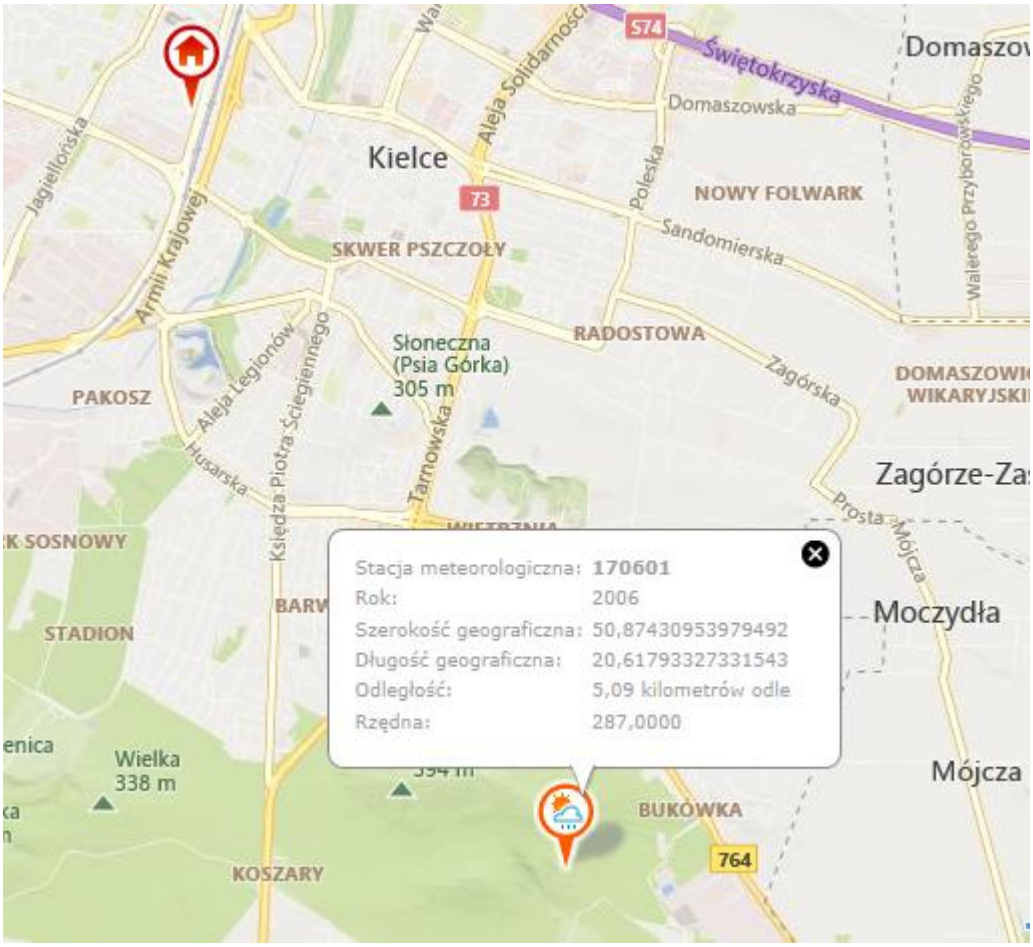
Tabela 14. Parametry użytkowania budynku

Powierzchnia na osobę	30.000 m^2
Jawne zyski ciepła na osobę	73.27 W
Utajone zyski ciepła na osobę	58.61 W
Gęstość obciążenia oświetlenia	0.60 W/m^2
Gęstość obciążenia mocy	1.50 W/m^2
Zestawienie użytkowania	Użytkowanie domu – 24 godziny
Nastawa ogrzewania	20.00 °C
Nastawa chłodzenia	25.00 °C

3.4. Lokalizacja i dane klimatyczne

Jednym z kluczowych elementów analizy energetycznej budynku jest przypisanie mu odpowiedniej lokalizacji geograficznej, która determinuje zestaw danych klimatycznych wykorzystywanych w obliczeniach. W niniejszym opracowaniu przyjęto lokalizację Kielce. Przypisanie lokalizacji w programie Revit odbywa się poprzez wskazanie na mapie miasta lub bezpośrednie wprowadzenie współrzędnych geograficznych. Poniżej zamieszczono zrzut ekranu z programu Revit, na którym widoczna jest przypisana stacja meteorologiczna, zlokalizowana w miejscowości Suków, z której dane pogodowe są automatycznie pobierane do obliczeń w module Insight.

[Tekst alternatywny do rys 4. Rysunek przedstawia fragment mapy okolic Kielc z zaznaczonymi dwoma punktami. Czerwony znacznik z symbolem domku, umieszczony na północny zachód od centrum mapy, wskazuje lokalizację budynku. Drugi znacznik, w kolorze niebiesko-pomarańczowym, przedstawia stację meteorologiczną znajdującą się w Sukowie, na południowy wschód od centrum Kielc. Obok znacznika stacji widoczny jest dymek z informacjami: numer stacji 170601, rok 2006, współrzędne geograficzne 50,874309593979492 szerokości północnej i 20,61793327331543 długości wschodniej, odległość 5,09 kilometra oraz rzędna 287 metrów.]



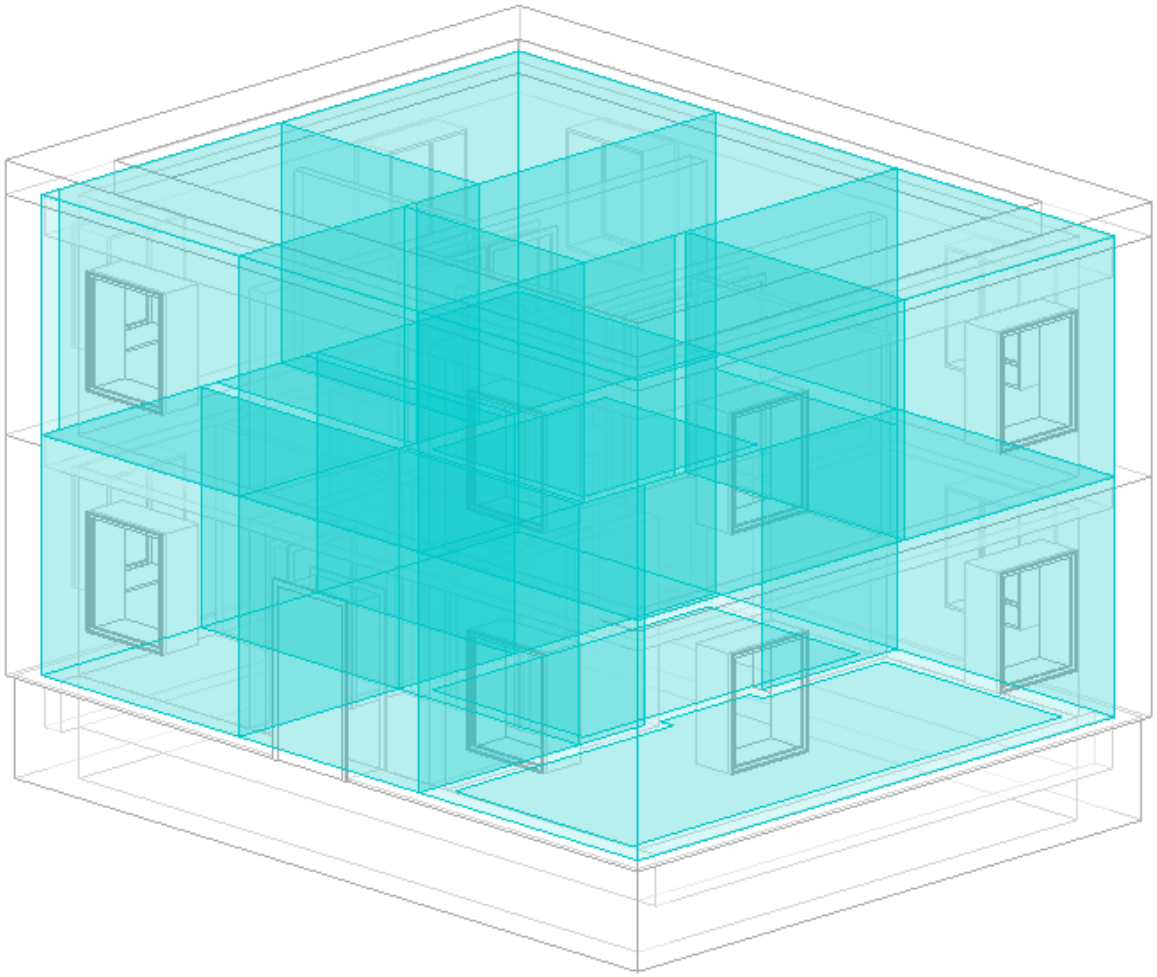
Rys. 4. Mapa z zaznaczoną lokalizacją stacji meteorologicznej Suków

Bazowo budynek został zorientowany tak, aby główne pomieszczenia mieszkalne (salon i sypialnie) były skierowane w stronę południową, co pozwala na maksymalne wykorzystanie zysków słonecznych w okresie zimowym.

3.5. Model analityczny

Na rysunku 5 przedstawiono wygenerowany model analityczny budynku, który został utworzony w oparciu o szczegółowe elementy modelu architektonicznego. W ustawieniach Energy Analytical Model przyjęto tryb „Use Detailed Elements”, dzięki czemu do obliczeń zostały uwzględnione rzeczywiste warstwy przegród i wynikające z nich współczynniki przenikania ciepła U. Podział modelu na strefy został oparty na zdefiniowanych w projekcie pomieszczeniach (Spaces), a granice przegród określono w osi geometrycznej elementów (Centerline). Model nie stosował dodatkowych uproszczeń w zakresie mostków cieplnych, lecz bazował na geometrii wynikającej bezpośrednio z modelu BIM.

[Tekst alternatywny do rys 5. Rysunek przedstawia model analityczny budynku, widziany w ujęciu trójwymiarowym. Obiekt został odwzorowany w postaci półprzezroczystych, niebieskich brył geometrycznych, które wyznaczają granice poszczególnych stref i elementów konstrukcyjnych. Widoczne są zarysy ścian z otworami okiennymi i drzwiowymi.]



Rys. 5. Model analityczny obiektu

Przyjęte w niniejszej analizie ustawienia modelu analitycznego przedstawiono w tabeli 15.

Tabela 15. Ustawienia do modelu analitycznego

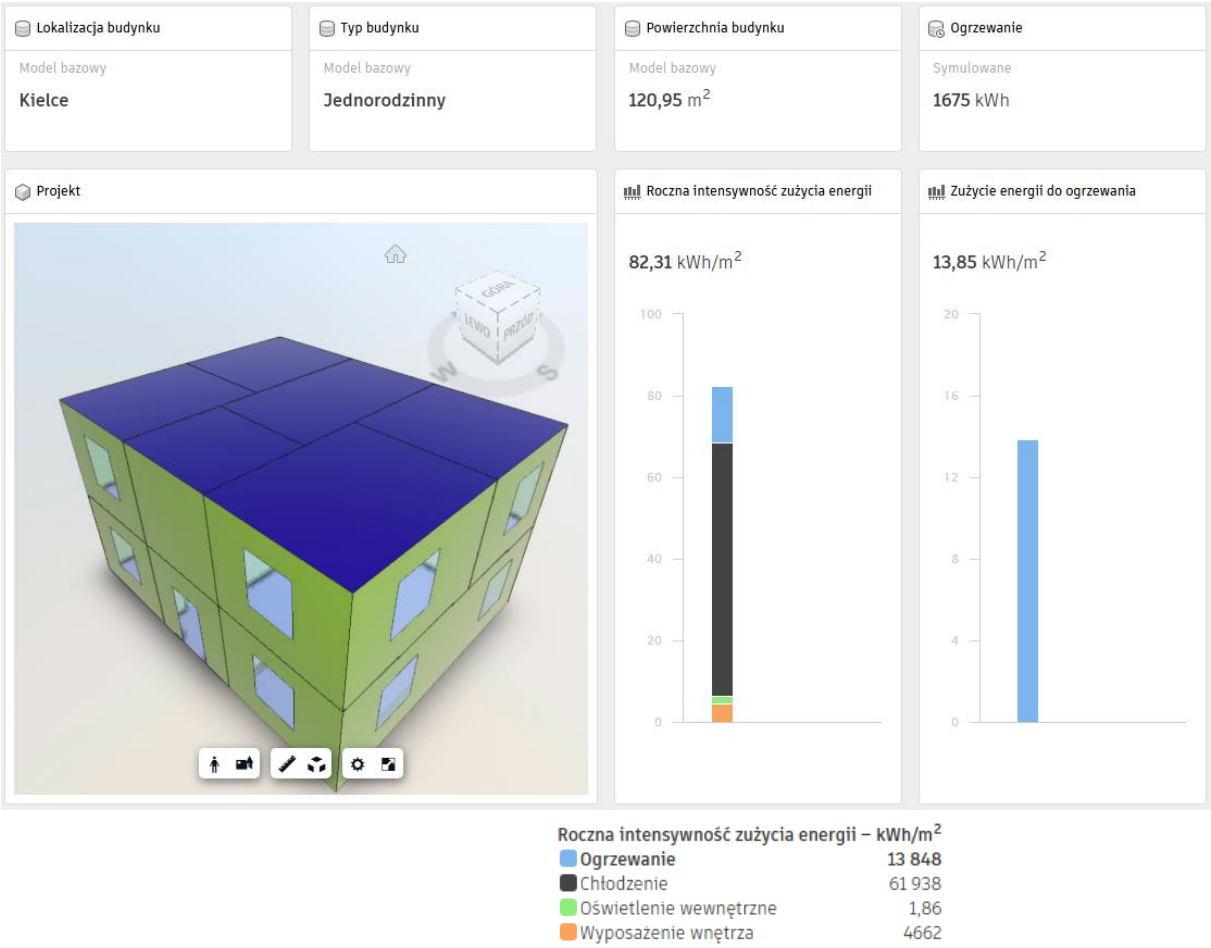
Analityczny model energetyczny	
Tryb	Użyj brył koncepcyjnych i elementów budynku
Używaj tylko elementów widocznych w bieżącym widoku	☐
Płaszczyzna terenu	Poziom 0
Etap projektu	Etap 1
Rozdzielczość przestrzeni analitycznej	200.0
Rozdzielczość powierzchni analitycznej	100.0

Rozdzielczość przestrzeni analitycznej (200 mm) oraz powierzchni analitycznej (100 mm) ustawiono na poziomie znacząco dokładniejszym niż wartości domyślne w programie Revit. Takie podejście umożliwia precyzyjne odwzorowanie szczegółów geometrycznych.

4. Wyniki symulacji dla modelu bazowego

Model bazowy, którego założenia zostały opisane w punkcie 3, stanowi punkt odniesienia dla wszystkich dalszych wariantów analizowanych w programie Autodesk Insight Carbon Analysis. Na rysunku 6, będącego widokiem okna Insight przedstawiono wyniki obliczeń energetycznych uzyskanych dla tego modelu.

[Tekst alternatywny do Rys 6. Rysunek przedstawia zestawienie wyników analizy energetycznej. Po lewej stronie widoczny jest uproszczony trójwymiarowy model obiektu, przedstawiony jako prosta bryła w kolorze zielonym z zaznaczonymi otworami okiennymi i granatowym dachem. W górnej części rysunku umieszczono podstawowe informacje: lokalizacja – Kielce, typ budynku – jednorodzinny, powierzchnia – 120,95 m², a także wartość symulowanego zapotrzebowania na ogrzewanie wynoszącą 1675 kWh. W środkowej części znajdują się dwa wykresy słupkowe. Pierwszy z nich przedstawia roczną intensywność zużycia energii, która wynosi 82,31 kWh/m², z podziałem na ogrzewanie, chłodzenie, oświetlenie wewnętrzne oraz wyposażenie wnętrza. Drugi wykres pokazuje zużycie energii wyłącznie na cele ogrzewania, wynoszące 13,85 kWh/m². Pod wykresami znajduje się legenda z wartościami rocznego zużycia energii: ogrzewanie – 13848 kWh, chłodzenie – 61938 kWh, oświetlenie wewnętrzne – 1686 kWh, wyposażenie wnętrza – 4662 kWh.]



Rys. 6. Zestawienie wyników analizy energetycznej

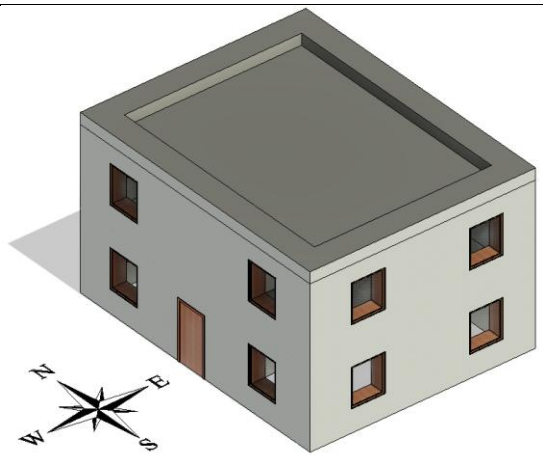
Analiza wyników symulacji dla modelu bazowego wskazuje, że całkowita roczna intensywność zużycia energii wynosi 82,31 kWh/m², co obejmuje zapotrzebowanie na ogrzewanie, chłodzenie, oświetlenie oraz urządzenia wewnętrzne. Wśród poszczególnych kategorii największy udział w bilansie energetycznym budynku ma chłodzenie – 61,94 kWh/m², co stanowi ponad 75% całkowitego zużycia.
Zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania wynosi 13,85 kWh/m², co plasuje budynek na granicy kryteriów standardu pasywnego (≤15 kWh/m²·rok według PHI). Oznacza to, że w warunkach klimatycznych Kielc model bazowy spełnia wymagania budownictwa pasywnego w zakresie ogrzewania.
Udział oświetlenia (1,86 kWh/m²) i urządzeń wewnętrznych (4,66 kWh/m²) w całkowitym bilansie jest marginalny, co potwierdza, że głównymi determinantami efektywności energetycznej są straty i zyski ciepła związane z klimatem oraz izolacyjnością przegród.

5. Wyniki symulacji - warianty

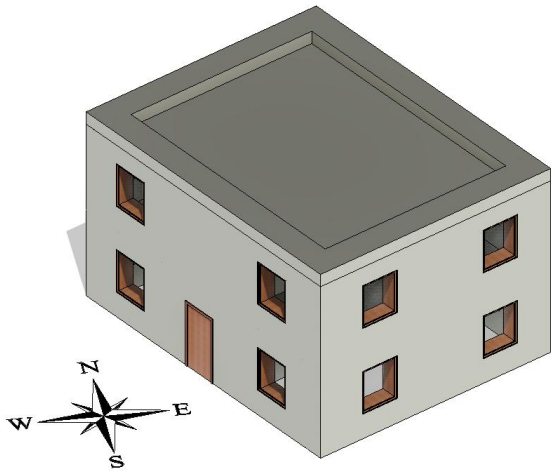
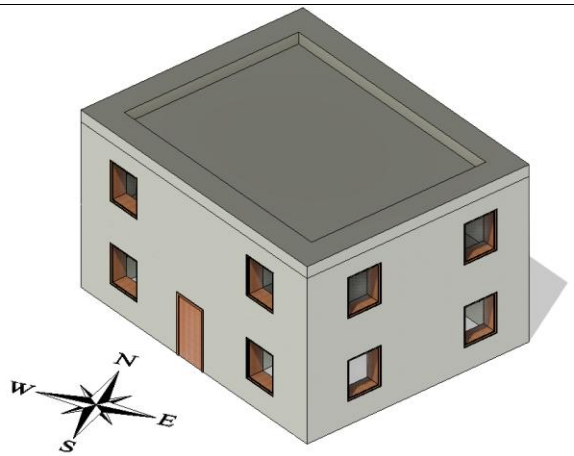
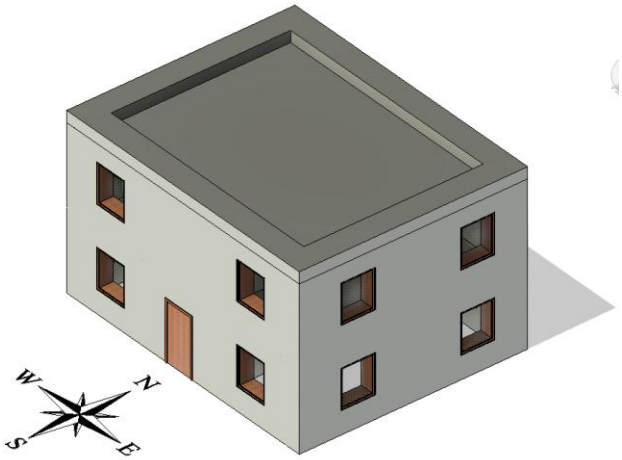
5.1. Wariant I – orientacja budynku

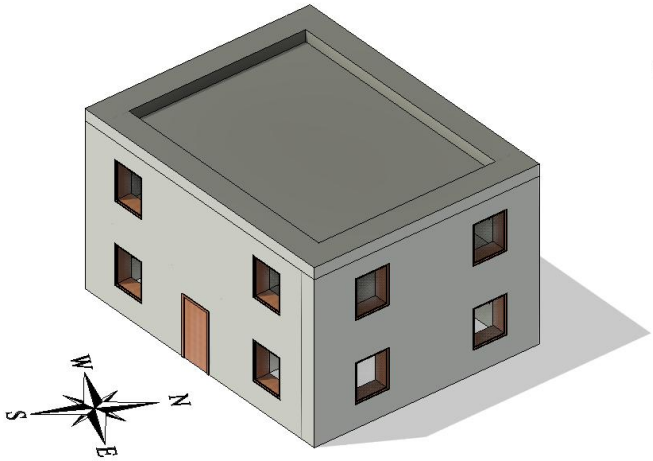
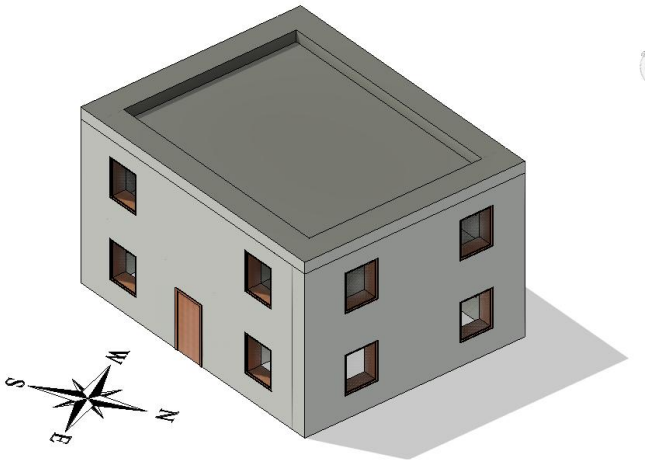
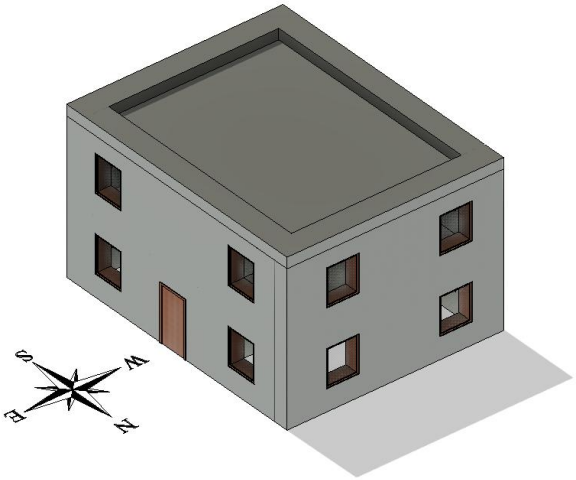
Orientacja budynku względem stron świata jest jednym z czynników tradycyjnie uznawanych za istotny element kształtowania bilansu energetycznego obiektów niskoenergetycznych i pasywnych. Odpowiednie usytuowanie pomieszczeń oraz przeszkleń pozwala na maksymalne wykorzystanie zysków słonecznych w okresie zimowym oraz ograniczenie ryzyka przegrzewania w miesiącach letnich. W niniejszej analizie w ramach wariantu I przeprowadzono serię symulacji, w których badano wpływ rotacji budynku na roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania. Model bazowy zestawiono z kolejnymi wariantami orientacji w pełnym zakresie kątowym. Wyniki symulacji zestawiono w tabeli nr 16.

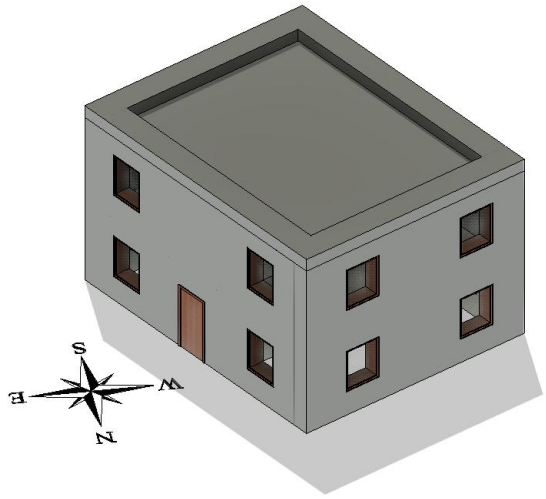
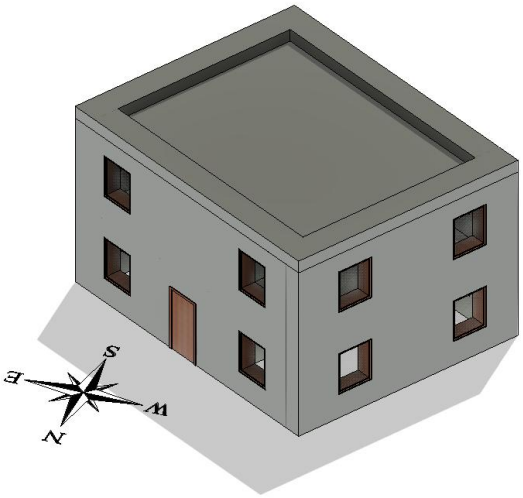
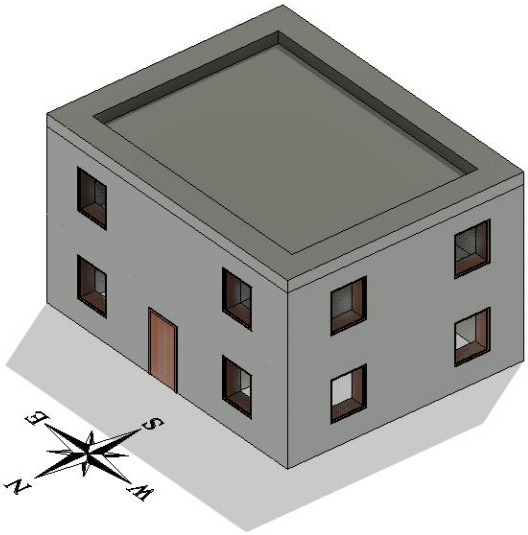
Tabela 16. Zestawienie symulacji wpływu orientacji budynku względem stron świata na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

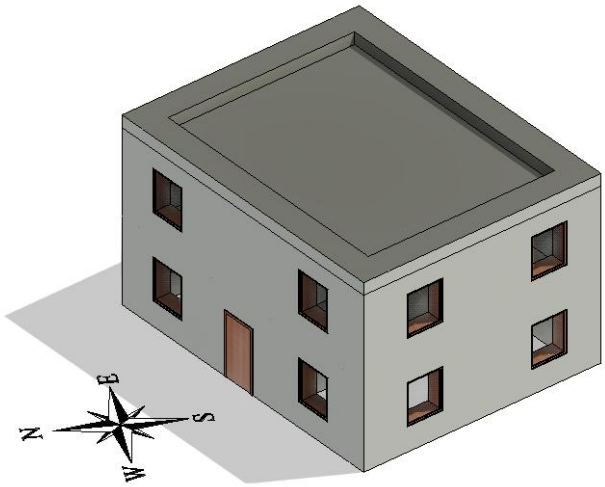
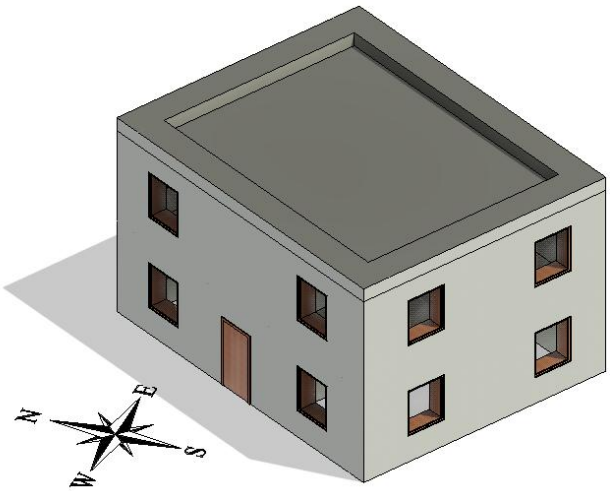
Wyniki symulacji	Wizualizacja wariantu
Orientacja budynku 0 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2 Model bazowy	

Politechnika Świętokrzyska Kielce University of Technology
Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki" nr FERS.01.05-IP.08-0234/23

Orientacja budynku 30 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,87 kWh/m^2 Różnica +0,1 %	
Orientacja budynku 60 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,57 kWh/m^2 Różnica -2,1 %	
Orientacja budynku 90 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,55 kWh/m^2 Różnica -2,2 %	

Orientacja budynku 120 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,64 kWh/m^2 Różnica -1,5 %	
Orientacja budynku 150 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,92 kWh/m^2 Różnica +0,5%	
Orientacja budynku 180 ° Zużycie energii do ogrzewania 14,01 kWh/m^2 Różnica +1,1%	

Orientacja budynku 210 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,92 kWh/m^2 Różnica +0,5%	
Orientacja budynku 240 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2 Różnica 0%	
Orientacja budynku 270 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,73 kWh/m^2 Różnica -0,9%	

Orientacja budynku 300 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,73 kWh/m^2 Różnica -0,9%	
Orientacja budynku 330 ° Zużycie energii do ogrzewania 13,87 kWh/m^2 Różnica +0,1%	

Wyniki symulacji wskazują, że różnice względem modelu bazowego są minimalne i mieszczą się w przedziale od 0,1% do 2,1%**.** Oznacza to, że w analizowanym przypadku zmiana orientacji nie wpływa w istotny sposób na bilans energetyczny budynku. Tak niewielki wpływ orientacji wynika przede wszystkim z faktu, że rozkład przeszkleń oraz układ funkcjonalny pomieszczeń został zoptymalizowany już na etapie projektowym. W konsekwencji rotacja całego budynku wokół własnej osi nie zmienia znacząco bilansu zysków słonecznych ani strat cieplnych.

5.2. Wariant II – zacienienie okien

W drugim wariancie przeanalizowano wpływ współczynnika zacienienia (SC, Shading Coefficient) dla stolarki okiennej na zapotrzebowanie energetyczne budynku na cele ogrzewania. Symulacja obejmuje serię wariantów, w których przyjęto różne wartości SC dla okien: 0,65 (model bazowy), 0,50, 0,40, 0,30 oraz 0,20.

Współczynnik SC jest parametrem określającym zdolność do przepuszczania promieniowania słonecznego. Wskazuje, jaka część energii słonecznej, która dociera do powierzchni okna, przedostaje się do wnętrza pomieszczenia. Niższa wartość SC oznacza silniejsze ograniczenie zysków słonecznych – np. SC = 0,20 odpowiada 20% energii promieniowania słonecznego, która dociera do powierzchni okna. Parametr ten w programie Revit stanowi właściwość stałą okna i obowiązuje w obliczeniach przez cały rok, niezależnie od sezonu grzewczego czy chłodniczego. Wyniki przeprowadzonych symulacji dla różnych wartości współczynnika SC zestawiono w tabeli 17.

Tabela 17. Zestawienie symulacji wpływu zacienienia okien na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Zacienienie okien (SC)	Wyniki symulacji	Różnica
0,65	Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2	Model bazowy
0,5	Zużycie energii do ogrzewania 15,48 kWh/m^2	+14,0%
0,4	Zużycie energii do ogrzewania 18,28 kWh/m^2	+34,6%
0,3	Zużycie energii do ogrzewania 19,7 kWh/m^2	+45,1%
0,2	Zużycie energii do ogrzewania 22,71 kWh/m^2	+67,2%

Wyniki symulacji wskazują jednoznacznie, że zmniejszenie wartości SC powoduje systematyczny wzrost zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania. Wyniki potwierdzają, że silne ograniczenie przepuszczalności energii słonecznej prowadzi do zmniejszenia zysków wewnętrznych w okresie zimowym i tym samym zwiększa zapotrzebowanie na ogrzewanie. W analizowanym przypadku najbardziej korzystny bilans energetyczny w kontekście ogrzewania uzyskano dla wartości SC = 0,65, odpowiadającej oknom o wyższej przepuszczalności promieniowania słonecznego.

5.3. Wariant III – izolacja ścian

W wariancie III przeanalizowano wpływ grubości warstwy izolacyjnej ścian na zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania. Model bazowy przyjęto dla izolacji o grubości 300 mm, natomiast symulacje przeprowadzono dla wartości od 100 mm do 500 mm, obejmując zarówno warianty niedoizolowane, jak i przewymiarowane względem rozwiązania referencyjnego.

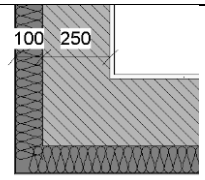
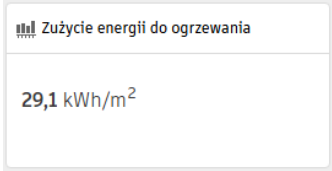
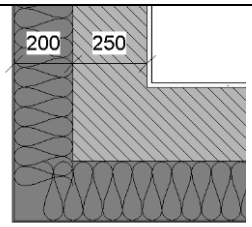
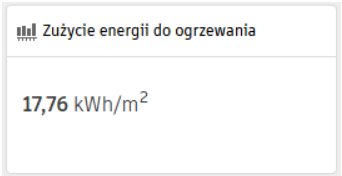
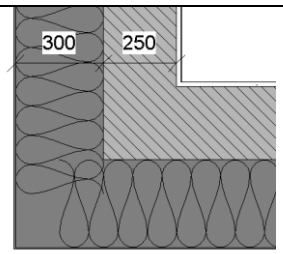
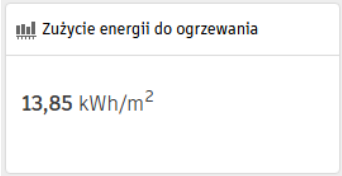
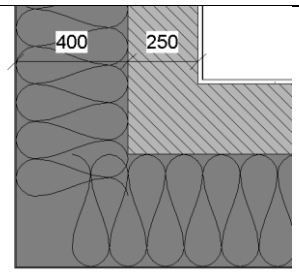
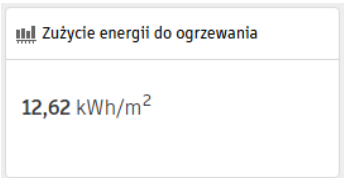
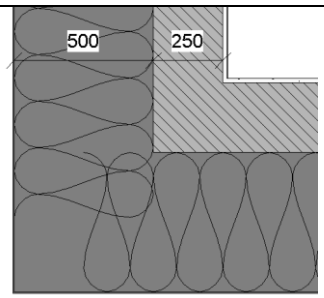
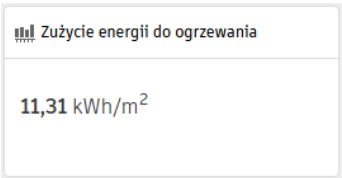
W tabeli 18 przedstawiono zestawienie wartości współczynnika przenikania ciepła (U) oraz oporu cieplnego (R) dla ścian zewnętrznych przy różnych grubościach warstwy izolacji termicznej. Wraz ze zwiększaniem grubości izolacji od 100 mm do 500 mm współczynnik przenikania ciepła U obniża się z 0,3255 W/(m²·K) do 0,0690 W/(m²·K), natomiast opór cieplny R wzrasta z 3,07 do 14,50 (m²·K)/W.

Tabela 18. Zestawienie parametrów cieplnych ścian zewnętrznych w zależności od grubości izolacji

Typ	Współczynnik przenikania ciepła	Opór cieplny (R)
Ściana zewnętrzna - izolacja 100mm	0.3255 W/(m²·K)	3.0725 (m²·K)/W
Ściana zewnętrzna - izolacja 200mm	0.1686 W/(m²·K)	5.9297 (m²·K)/W
Ściana zewnętrzna - izolacja 300mm	0.1138 W/(m²·K)	8.7868 (m²·K)/W
Ściana zewnętrzna - izolacja 400mm	0.0859 W/(m²·K)	11.6440 (m²·K)/W
Ściana zewnętrzna - izolacja 500mm	0.0690 W/(m²·K)	14.5011 (m²·K)/W

Wyniki symulacji zestawiono w tabeli 19.

Tabela 19. Zestawienie symulacji wpływu grubości izolacji ściany zewnętrznej na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Grubość izolacji	Wizualizacja wariantu	Wyniki symulacji	Różnica
100 mm			+52,4%
200 mm			+22,0%
300 mm			Model bazowy
400 mm			-9,7%
500 mm			-22,4%

Analiza jednoznacznie pokazuje, że ściany zewnętrzne odgrywają kluczową rolę w bilansie energetycznym budynku. Redukcja grubości izolacji do 200 mm powoduje wzrost zapotrzebowania na ogrzewanie o 22,0%, a przy 100 mm wzrost ten sięga aż 52,4%. Z kolei zwiększenie izolacji powyżej wartości bazowej przynosi istotne

korzyści energetyczne: przy 400 mm zapotrzebowanie spada o 9,7%, a przy 500 mm aż o 22,4% względem modelu referencyjnego.

5.4. Wariant IV – izolacja stropu zewnetrznego

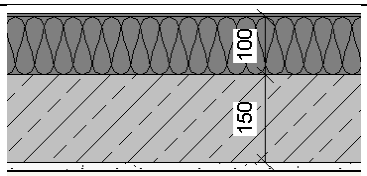
W ramach wariantu IV przeanalizowano wpływ zmiany grubości izolacji stropu zewnętrznego na roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania. Model bazowy odpowiada grubości 300 mm, natomiast symulacje wykonano dla wartości od 100 mm do 500 mm, obejmując zarówno przypadki niedoizolowania, jak i przewymiarowania warstwy izolacyjnej.
W tabeli 20 zestawiono parametry cieplne stropodachu dla różnych grubości izolacji. Zwiększanie warstwy izolacyjnej od 100 mm do 500 mm powoduje systematyczne obniżenie współczynnika przenikania ciepła U z 0,3296 W/(m²·K) do 0,0691 W/(m²·K), co odpowiada równoczesnemu wzrostowi oporu cieplnego R z 3,03 do 14,46 (m²·K)/W.

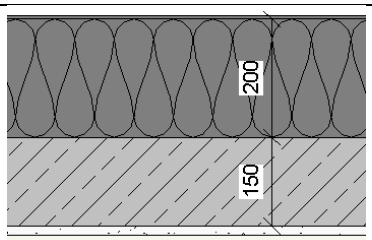
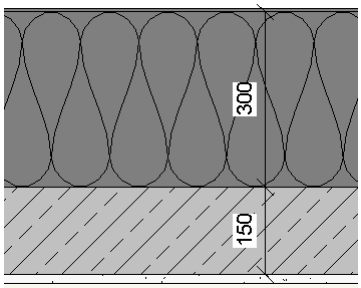
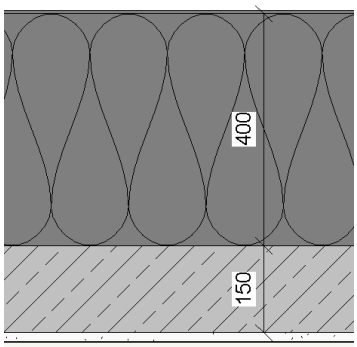
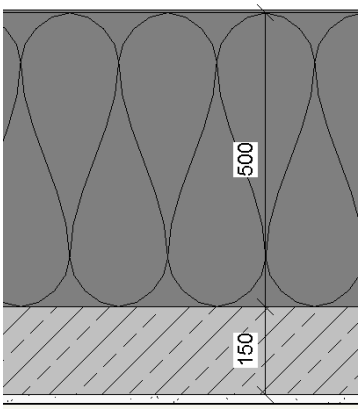
Tabela 20. Zestawienie parametrów cieplnych stropu zewnętrznego w zależności od grubości izolacji

Typ	Współczynnik przenikania ciepła	Opór cieplny (R)
Strop zew. - izolacja 100mm	0.3296 W/(m²·K)	3.0336 (m²·K)/W
Strop zew. - izolacja 200mm	0.1698 W/(m²·K)	5.8908 (m²·K)/W
Strop zew. - izolacja 300mm	0.1143 W/(m²·K)	8.7479 (m²·K)/W
Strop zew. - izolacja 400mm	0.0862 W/(m²·K)	11.6051 (m²·K)/W
Strop zew. - izolacja 500mm	0.0691 W/(m²·K)	14.4622 (m²·K)/W

Wyniki przeprowadzonych symulacji zestawiono w tabeli nr 21.

Tabela 21. Zestawienie symulacji wpływu grubości izolacji stropu zewnętrznego na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Grubość izolacji	Wizualizacja wariantu	Wyniki symulacji	Różnica
100 mm		Zużycie energii do ogrzewania 20,55 kWh/m²	+32,6%

200 mm		Zużycie energii do ogrzewania 15,57 kWh/m^2	+11,1%
300 mm		Wyświetlanie danych 13,85 kWh/m^2	Model bazowy
400 mm		Zużycie energii do ogrzewania 12,98 kWh/m^2	-6,7%
500 mm		Zużycie energii do ogrzewania 12,47 kWh/m^2	-11,1%

Analiza wskazuje jednoznacznie, że zmniejszenie grubości izolacji w stosunku do modelu bazowego prowadzi do znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię do ogrzewanie. Dla grubości 200 mm zapotrzebowanie wzrosło o 11,1%, a dla 100 mm aż o 32,6% względem modelu referencyjnego. Z kolei zwiększanie grubości izolacji powyżej wartości bazowej przynosi już stosunkowo niewielkie efekty. Przy 400 mm uzyskano redukcję zapotrzebowania o 6,7%, natomiast dla 500 mm o 11,1%.

5.5. Wariant V – izolacja podłogi na gruncie

W kolejnym wariancie przeanalizowano wpływ zmiany grubości izolacji termicznej podłogi na gruncie na zapotrzebowanie budynku na energię użytkową do ogrzewania.

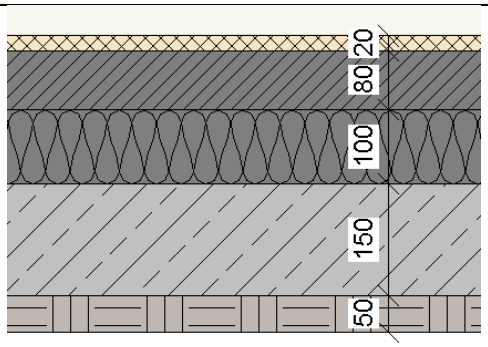
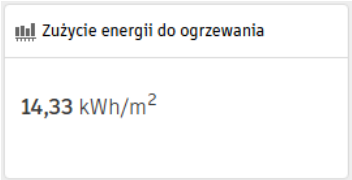
W tabeli 22 przedstawiono parametry cieplne podłogi na gruncie w zależności od grubości zastosowanej izolacji. Wzrost grubości izolacji z 100 mm do 500 mm powoduje obniżenie współczynnika przenikania ciepła U z 0,3084 W/(m²·K) do 0,0682 W/(m²·K), przy jednoczesnym wzroście oporu cieplnego R z 3,24 do 14,67 (m²·K)/W.

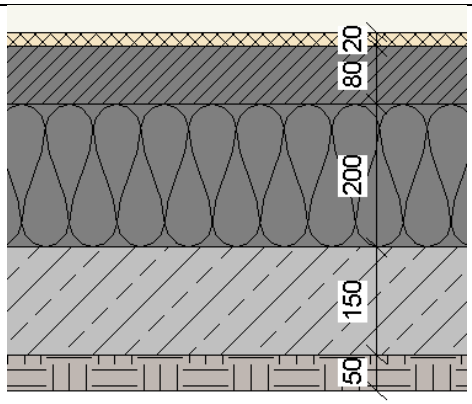
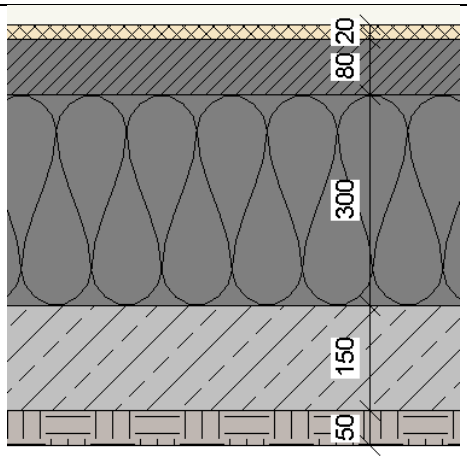
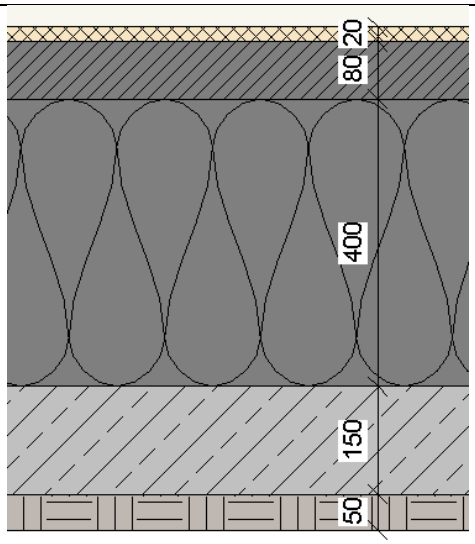
Tabela 22. Zestawienie parametrów cieplnych stropu zewnętrznego w zależności od grubości izolacji

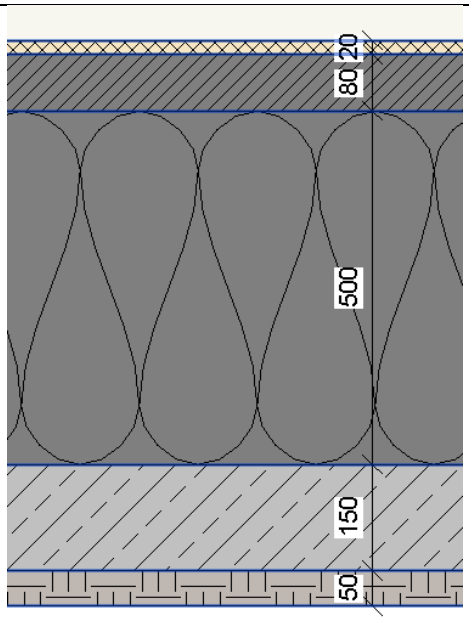
Typ	Współczynnik przenikania ciepła	Opór cieplny (R)
Podłoga na gruncie - izolacja 100mm	0.3084 W/(m²·K)	3.2429 (m²·K)/W
Podłoga na gruncie - izolacja 200mm	0.1639 W/(m²·K)	6.1001 (m²·K)/W
Podłoga na gruncie - izolacja 300mm	0.1116 W/(m²·K)	8.9572 (m²·K)/W
Podłoga na gruncie - izolacja 400mm	0.0846 W/(m²·K)	11.8144 (m²·K)/W
Podłoga na gruncie - izolacja 500mm	0.0682 W/(m²·K)	14.6715 (m²·K)/W

Model bazowy przyjęto dla izolacji o grubości 300 mm, a następnie wykonano symulacje dla wartości od 100 mm do 500 mm. Wyniki z symulacji zestawiono w tabeli 23.

Tabela 23. Zestawienie symulacji wpływu grubości izolacji podłogi na gruncie na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Grubość izolacji	**Wizualizacja wariantu**	**Wyniki symulacji**	**Różnica**
100 mm			+3,4%

200 mm		Zużycie energii do ogrzewania 13,99 kWh/m^2	+1,0%
300 mm		Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2	Model bazowy
400 mm		Zużycie energii do ogrzewania 13,78 kWh/m^2	-0,5%

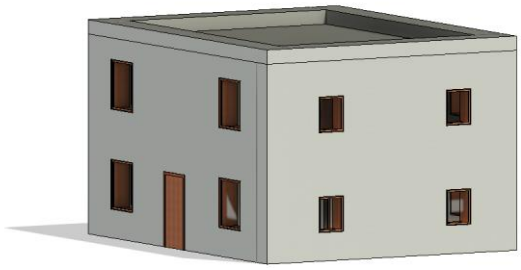
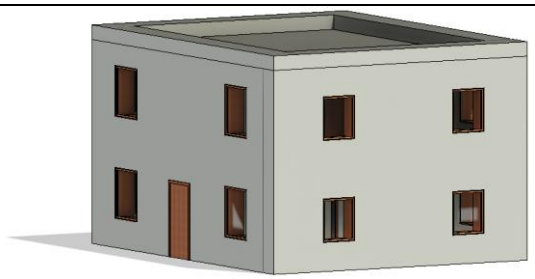
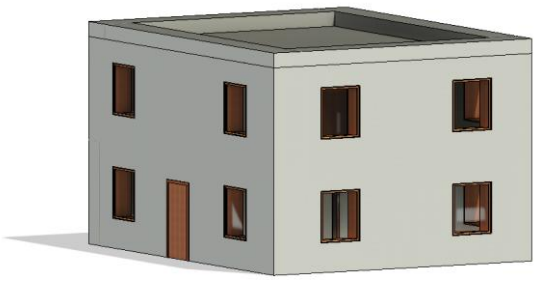
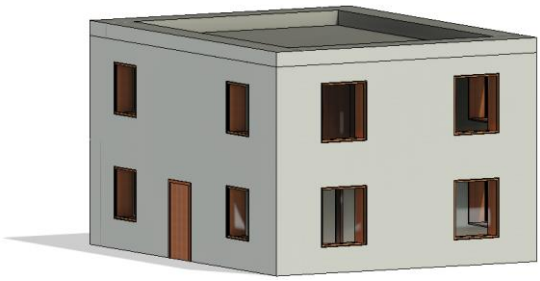
500 mm		Zużycie energii do ogrzewania 13,73 kWh/m²	-0,9%

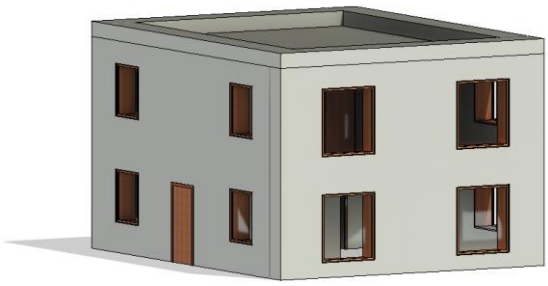
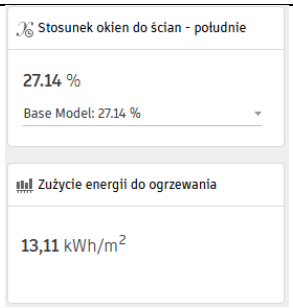
Analiza wskazuje, że zmiany grubości izolacji podłogi mają znacznie mniejszy wpływ na bilans energetyczny budynku niż w przypadku izolacji stropodachu. Redukcja izolacji do 200 mm powoduje wzrost zapotrzebowania na energię o zaledwie 1,0%, a do 100 mm o 3,4% w stosunku do modelu bazowego. Z kolei zwiększanie grubości powyżej 300 mm przynosi niewielkie korzyści: dla 400 mm uzyskano redukcję o 0,5%, a dla 500 mm o 0,9%.

5.6. Wariant VI – powierzchnia okien po stronie południowej

Wariant VI dotyczy wpływu powierzchni okien zlokalizowanych po stronie południowej na zapotrzebowanie budynku na energię użytkową do ogrzewania. Model bazowy odpowiada oknom o wymiarach 1200 × 1400 mm, natomiast przeprowadzono symulacje dla mniejszych oraz większych rozmiarów okien w zakresie od 800 × 1000 mm do 1600 × 1800 mm. Szczegółowe zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 24.

Tabela 24. Zestawienie wyników symulacji wpływu powierzchni okien po stronie południowej na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Rozmiar okien	Wizualizacja wariantu	Wyniki symulacji	Różnica
800 mm x 1000 mm		Stosunek okien do ścian - południe 7.54 % Base Model: 7.54 % Zużycie energii do ogrzewania 14,72 kWh/m^2	+5,9%
1000 mm x 1200 mm		Stosunek okien do ścian - południe 11.31 % Base Model: 11.31 % Zużycie energii do ogrzewania 14,26 kWh/m^2	+2,9%
1200 mm x 1400 mm		Stosunek okien do ścian - południe 15.83 % Base Model: 15.83 % Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2	Model bazowy
1400 mm x 1600 mm		Stosunek okien do ścian - południe 21.11 % Base Model: 21.11 % Zużycie energii do ogrzewania 13,46 kWh/m^2	-2,9%

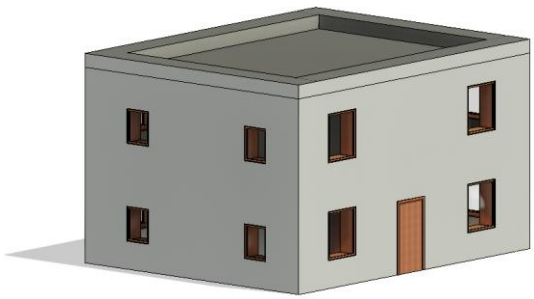
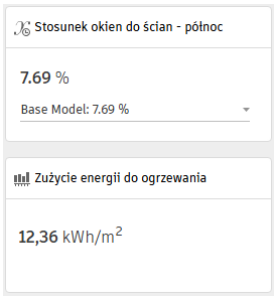
1600 mm x 1800 mm			-5,6%

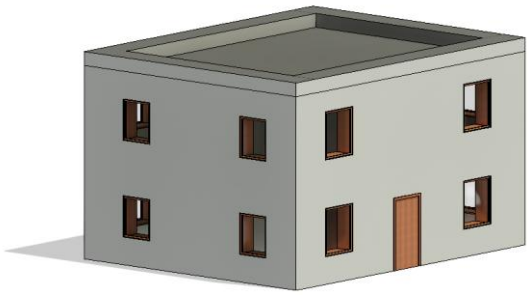
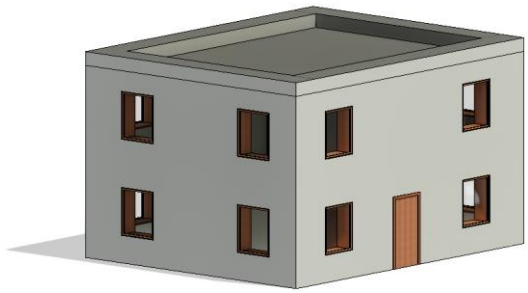
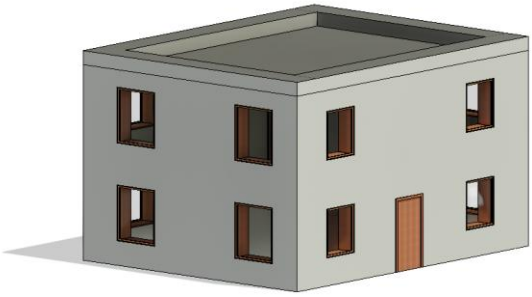
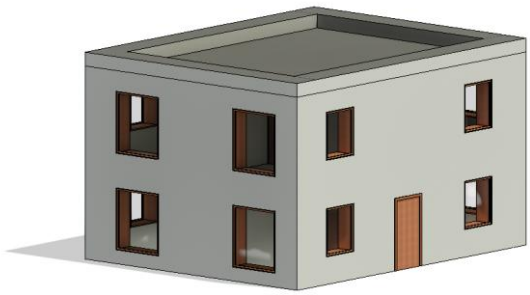
Zmniejszenie powierzchni okien względem modelu bazowego prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na energię: dla okien o wymiarach 1000 × 1200 mm o 2,9%, a dla 800 × 1000 mm aż o 5,9%. Z kolei powiększanie okien w kierunku 1400 × 1600 mm i 1600 × 1800 mm skutkuje redukcją zapotrzebowania na energię odpowiednio o 2,9% i 5,6% względem modelu bazowego.

5.7. Wariant VII – powierzchnia okien po stronie północnej

Wariant VII dotyczy wpływu powierzchni okien zlokalizowanych po stronie północnej na zapotrzebowanie budynku na energię użytkową do ogrzewania. Model bazowy odpowiada oknom o wymiarach 1200 × 1400 mm, natomiast przeprowadzono symulacje dla mniejszych oraz większych rozmiarów okien w zakresie od 800 × 1000 mm do 1600 × 1800 mm. Szczegółowe zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 25.

Tabela 25. Zestawienie wyników symulacji wpływu powierzchni okien po stronie północnej na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Rozmiar okien	Wizualizacja wariantu	Wyniki symulacji	Różnica
800 mm x 1000 mm			-12,1%

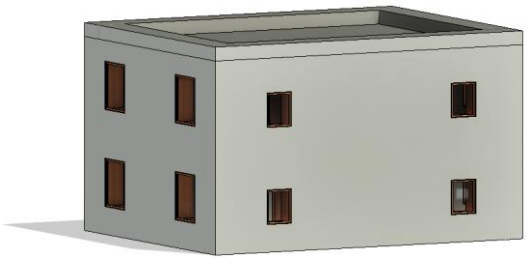
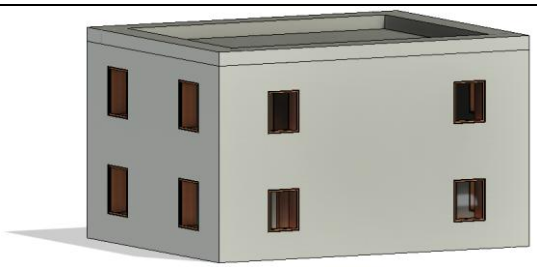
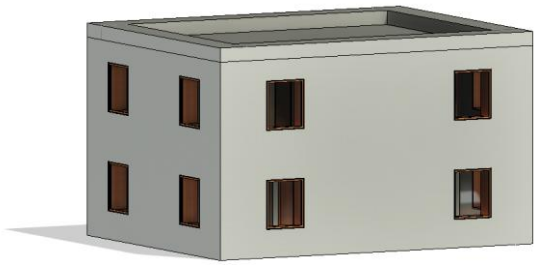
1000 mm x 1200 mm		Stosunek okien do ścian - północ 11.53 % Base Model: 11.53 % Zużycie energii do ogrzewania 13,04 kWh/m^2	-6,2%
1200 mm x 1400 mm		Stosunek okien do ścian - północ 16.14 % Base Model: 16.14 % Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2	Model bazowy
1400 mm x 1600 mm		Stosunek okien do ścian - północ 21.52 % Base Model: 21.52 % Zużycie energii do ogrzewania 14,77 kWh/m^2	+6,2%
1600 mm x 1800 mm		Stosunek okien do ścian - północ 27.67 % Base Model: 27.67 % Zużycie energii do ogrzewania 15,82 kWh/m^2	+12,5%

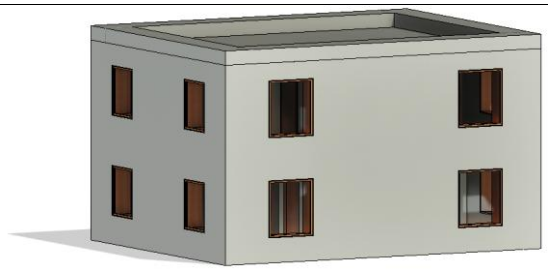
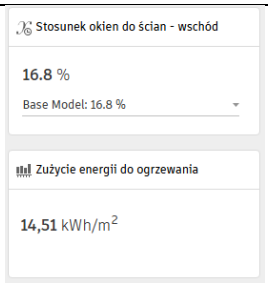
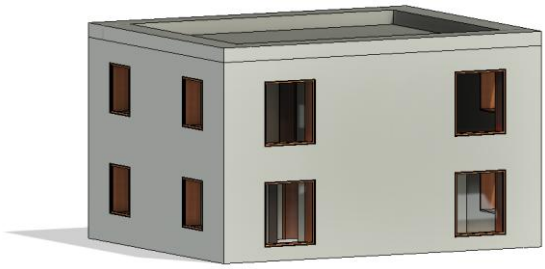
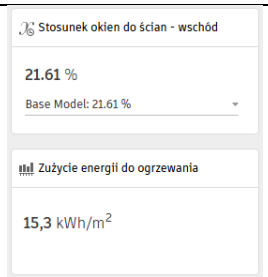
Analiza wskazuje, że zwiększanie powierzchni okien od strony północnej prowadzi do systematycznego wzrostu zapotrzebowania budynku na energię użytkową do ogrzewania. W przypadku najmniejszych okien (800 × 1000 mm) zapotrzebowanie spadło o 12,1% względem modelu bazowego, a dla wariantu 1000 × 1200 mm redukcja wyniosła 6,2%. Natomiast powiększanie okien powyżej wymiarów bazowych skutkuje pogorszeniem charakterystyki energetycznej dla okien 1400 × 1600 mm zapotrzebowanie wzrosło o 6,2%, a dla największych (1600 × 1800 mm) aż o 12,5%.

5.8. Wariant VIII – powierzchnia okien po stronie wschodniej

Wariant VIII dotyczy wpływu powierzchni okien zlokalizowanych po stronie wschodniej na zapotrzebowanie budynku na energię użytkową do ogrzewania. Model bazowy odpowiada oknom o wymiarach 1200 × 1400 mm, natomiast przeprowadzono symulacje dla mniejszych oraz większych rozmiarów okien w zakresie od 800 × 1000 mm do 1600 × 1800 mm. Szczegółowe zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 26.

Tabela 26. Zestawienie wyników symulacji wpływu powierzchni okien po stronie wschodniej na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Rozmiar okien	Wizualizacja wariantu	Wyniki symulacji	Różnica
800 mm x 1000 mm		Stosunek okien do ścian - wschód 6 % Base Model: 6 % Zużycie energii do ogrzewania 12,77 kWh/m^2	-8,5%
1000 mm x 1200 mm		Stosunek okien do ścian - wschód 9 % Base Model: 9 % Zużycie energii do ogrzewania 13,27 kWh/m^2	-4,4%
1200 mm x 1400 mm		Stosunek okien do ścian - wschód 12.6 % Base Model: 12.6 % Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2	Model bazowy

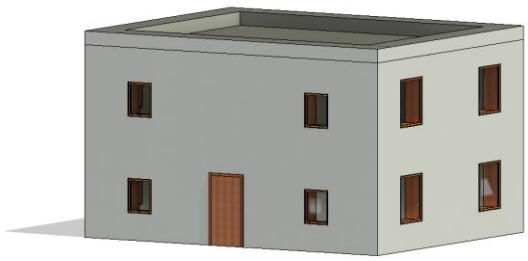
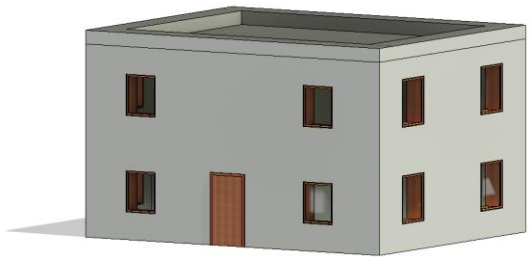
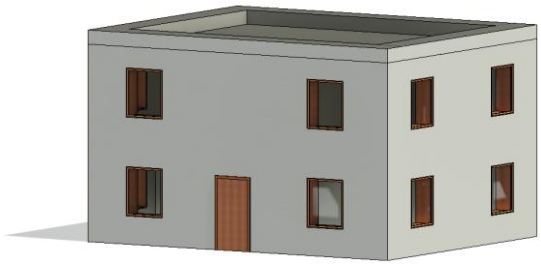
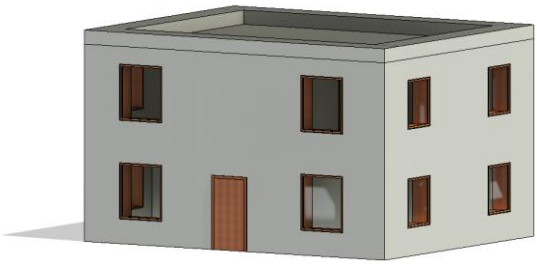
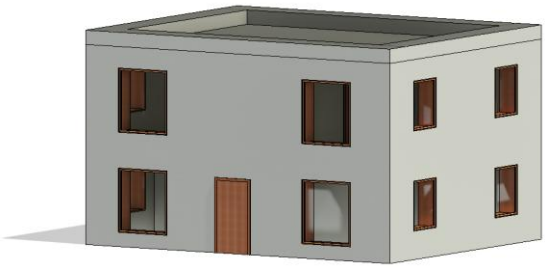
1400 mm x 1600 mm			+4,5%
1600 mm x 1800 mm			+9,5%

Analiza wpływu powierzchni okien po stronie wschodniej wykazała, że zmniejszenie przeszkleń względem modelu bazowego sprzyja ograniczeniu zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Dla najmniejszych okien (800 × 1000 mm) uzyskano redukcję o 8,5%, a dla wariantu 1000 × 1200 mm spadek o 4,4%. Natomiast powiększanie powierzchni okien względem wartości bazowej prowadzi do wzrostu strat ciepła przy wymiarach 1400 × 1600 mm zapotrzebowanie rośnie o 4,5%, a przy największych analizowanych oknach 1600 × 1800 mm aż o 9,5%.

5.9. Wariant IX – powierzchnia okien po stronie zachodniej

Wariant IX dotyczy wpływu powierzchni okien zlokalizowanych po stronie zachodniej na zapotrzebowanie budynku na energię użytkową do ogrzewania. Model bazowy odpowiada oknom o wymiarach 1200 × 1400 mm, natomiast przeprowadzono symulacje dla mniejszych oraz większych rozmiarów okien w zakresie od 800 × 1000 mm do 1600 × 1800 mm. Szczegółowe zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 27.

Tabela 27. Zestawienie wyników symulacji wpływu powierzchni okien po stronie zachodniej na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania

Rozmiar okien	Wizualizacja wariantu	Wyniki symulacji	Różnica
800 mm x 1000 mm		Stosunek okien do ścian - zachód 5.94 % Base Model: 5.94 % Zużycie energii do ogrzewania 12,91 kWh/m^2	-7,3%
1000 mm x 1200 mm		Stosunek okien do ścian - zachód 8.91 % Base Model: 8.91 % Zużycie energii do ogrzewania 13,34 kWh/m^2	-3,8%
1200 mm x 1400 mm		Stosunek okien do ścian - zachód 12.47 % Base Model: 12.47 % Zużycie energii do ogrzewania 13,85 kWh/m^2	Model bazowy
1400 mm x 1600 mm		Stosunek okien do ścian - zachód 16.63 % Base Model: 16.63 % Zużycie energii do ogrzewania 14,45 kWh/m^2	+4,2%
1600 mm x 1800 mm		Stosunek okien do ścian - zachód 21.38 % Base Model: 21.38 % Zużycie energii do ogrzewania 15,13 kWh/m^2	+8,5%

Symulacje wykazały, że zmniejszenie powierzchni okien po stronie zachodniej skutkuje ograniczeniem zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Dla wariantu 800 × 1000 mm redukcja wyniosła 7,3%, a dla 1000 × 1200 mm 3,8% w porównaniu z modelem bazowym. Z kolei powiększanie przeszkleń prowadzi do wzrostu strat energetycznych przy oknach 1400 × 1600 mm zapotrzebowanie rośnie o 4,2%, a przy największych (1600 × 1800 mm) aż o 8,5%.

6. Wnioski ogólne do symulacji

Przeprowadzone symulacje energetyczne w środowisku Autodesk Insight, oparte na modelu BIM przygotowanym w programie Revit, pozwoliły na wszechstronną analizę czynników wpływających na zapotrzebowanie domu pasywnego na energię użytkową do ogrzewania. Uzyskane wyniki wskazują jednoznacznie, że poszczególne parametry projektowe mają bardzo zróżnicowany wpływ na bilans cieplny budynku.
Orientacja budynku jako całości okazała się czynnikiem o najmniejszym znaczeniu. Różnice w zapotrzebowaniu na ogrzewanie pomiędzy poszczególnymi wariantami wynosiły od 0,1% do maksymalnie 2,2% względem modelu bazowego, co potwierdza, że przy zwartej bryle i równomiernym rozkładzie przeszkleń wpływ orientacji nie jest krytyczny. Jednak w bardziej rozbudowanych projektach, szczególnie przy dużych przeszkleniach od południa, rola orientacji mogłaby być istotniejsza.
Znacznie większe znaczenie wykazały analizy izolacyjności przegród zewnętrznych. Dla ścian zewnętrznych zmniejszenie grubości izolacji do 100 mm spowodowało wzrost zapotrzebowania na energię grzewczą aż o 52,4%, natomiast zwiększenie izolacji do 500 mm obniżyło to zapotrzebowanie o 22,4% względem modelu bazowego (300 mm). Podobną zależność zaobserwowano w przypadku stropodachu – przy izolacji 100 mm zapotrzebowanie wzrosło o 32,6%, natomiast przy 500 mm zmalało o 11,1%. Wpływ izolacji podłogi na gruncie okazał się mniej istotny – redukcja zapotrzebowania przy ociepleniu 500 mm w porównaniu z bazowym 300 mm wyniosła zaledwie 0,9%, a przy izolacji 100 mm obserwowano wzrost o 3,4%. Wyniki te potwierdzają, że dla bilansu cieplnego największe znaczenie mają straty przez ściany i dach, natomiast podłoga na gruncie odgrywa rolę drugorzędną.
Bardzo silny wpływ miały natomiast właściwości okien, zarówno pod względem zacienienia, jak i ich powierzchni w zależności od orientacji. Analiza współczynnika przepuszczalności promieniowania słonecznego (SC) wykazała, że jego obniżenie z wartości 0,65 (model bazowy) do 0,20 powoduje wzrost zapotrzebowania na energię

grzewczą aż o 67,2%. Dla wartości pośrednich (SC = 0,5; 0,4; 0,3) wzrost wynosił odpowiednio 14,0%, 34,6% i 45,1%.
Z kolei analiza powierzchni przeszkleń pokazała istotne różnice zależne od orientacji. Po stronie południowej powiększanie okien zwiększało zyski solarne i prowadziło do redukcji zapotrzebowania na energię do ogrzewania – o 2,9% przy wymiarach 1400 × 1600 mm i o 5,6% przy 1600 × 1800 mm. Natomiast zmniejszanie powierzchni okien względem bazowych (1200 × 1400 mm) powodowało wzrost zapotrzebowania o 2,9–5,9%, co potwierdza zasadność maksymalizacji przeszkleń południowych. Odwrotna sytuacja miała miejsce po stronie północnej. Tutaj najmniejsze okna (800 × 1000 mm) pozwalały zmniejszyć zapotrzebowanie o 12,1%, a wariant 1000 × 1200 mm o 6,2%, podczas gdy powiększanie powierzchni przeszkleń skutkowało wzrostem zapotrzebowania o 6,2% (1400 × 1600 mm) i 12,5% (1600 × 1800 mm). Wyniki jednoznacznie dowodzą, że w tej orientacji przeszklenia należy ograniczać do niezbędnego minimum.
W przypadku okien wschodnich i zachodnich obserwowano podobne tendencje. Dla strony wschodniej najmniejsze okna redukowały zapotrzebowanie odpowiednio o 8,5% (800 × 1000 mm) i 4,4% (1000 × 1200 mm), natomiast powiększanie powierzchni powodowało wzrost o 4,5% i 9,5%. Po stronie zachodniej redukcja przy najmniejszych przeszkleniach wyniosła 7,3% i 3,8%, a wzrost przy największych – 4,2% i 8,5%. Oznacza to, że zarówno wschodnie, jak i zachodnie przeszklenia powinny być ograniczane, ponieważ ich krótkotrwałe zyski słoneczne nie równoważą strat w sezonie grzewczym, a dodatkowo mogą powodować przegrzewanie latem.
Podsumowując, uzyskane wyniki potwierdzają fundamentalne zasady projektowania budynków pasywnych według PHI: maksymalizację przeszkleń po stronie południowej, minimalizację po stronie północnej oraz ograniczanie powierzchni okien wschodnich i zachodnich. Kluczowym elementem jest również wybór szyb o wysokiej przepuszczalności promieniowania słonecznego oraz zapewnienie wysokiej izolacyjności ścian i stropodachu. Orientacja całego budynku ma znaczenie drugorzędne, o ile bryła jest zwarta i symetryczna. Zastosowanie środowiska BIM w połączeniu z Autodesk Insight pozwoliło na przeprowadzenie dynamicznych symulacji wprost z modelu architektonicznego, eliminując konieczność ręcznego przenoszenia danych, co ogranicza ryzyko błędów i zwiększa wiarygodność analiz.

7. Spis literatury

1. Polski Instytut Budownictwa Pasywnego. (n.d.). *Polski Instytut Budownictwa Pasywnego*. https://www.pibp.pl/ (dostęp 12.09.2025).
2. Autodesk. (2024). Revit 2025 API User Manual. Autodesk Documentation. https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ENU/?guid=Revit_API_Revit_API_Develo

pers_Guide_Introduction_Getting_Started_Welcome_to_the_Revit_Platform_API_User_Manual_html (dostęp 12.09.2025).
3. Autodesk. (2025). Insight – Building Performance Analysis: What's New in 2025. Autodesk Knowledge Network. https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ENU/?guid=GUID-852A152E-0A74-4743-BCD8-8E99CD243105 (dostęp 12.09.2025).